

Obróbka skrawaniem stopów aluminium i magnezu

redakcja
Józef Kuczmaszewski
Kazimierz Zaleski



M
O
N
O
G
R
A
F
I
E

Obróbka skrawaniem stopów aluminium i magnezu

Monografie – Politechnika Lubelska



Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Obróbka skrawaniem stopów aluminium i magnezu

redakcja

Józef Kuczmaszewski

Kazimierz Zaleski



Politechnika Lubelska
Lublin 2015

Recenzent:

dr hab. inż. Jerzy Lipski, prof. Politechniki Lubelskiej

Autorzy:

Mariusz Kłonica Józef Kuczmaszewski

Jakub Matuszak Tomasz Pałka

Paweł Pieśko Rafał Rusinek

Maciej Włodarczyk Ireneusz Zagórski

Kazimierz Zaleski

Skład i redakcja techniczna: Tomasz Piech

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2015

ISBN: 978-83-7947-146-1

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatop.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 200 egz. Ogółem 17,15 ark. wyd. W tym w poszczególnych rozdziałach:

R 01 - 0,96 R 02 - 0,98 R 03 - 2,34 R 04 - 0,76 R 05 - 0,80 R 06 - 0,91 R 07 - 1,11 R 08 - 0,78
R 09 - 1,02 R 10 - 0,96 R 11 - 0,82 R 12 - 2,38 R 13 - 1,38 R 14 - 1,52 R 15 - 0,16

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	9
Wstęp	11
1. Aluminium i jego stopy (<i>Józef Kuczmaszewski, Paweł Pieško</i>)	13
1.1. Aluminium	14
1.2. Stopy aluminium do przeróbki plastycznej.....	15
1.3. Odlewnicze stopy aluminium	21
1.4. Ważniejsze grupy asortymentowe półfabrykatów ze stopów aluminium	24
Literatura.....	25
2. Magnez i jego stopy (<i>Józef Kuczmaszewski, Ireneusz Zagórski</i>).....	27
2.1. Właściwości fizyczne, chemiczne, technologiczne oraz użytkowe magnezu i jego stopów	27
2.2. Otrzymywanie magnezu i jego stopów	29
2.3. Ważniejsze stopy magnezu	30
2.4. Zastosowania stopów magnezu	33
2.5. Typowy asortyment handlowy magnezu i jego stopów.....	35
Literatura.....	36
3. Skrawalność stopów aluminium i magnezu (<i>Józef Kuczmaszewski, Paweł Pieško, Ireneusz Zagórski</i>).....	39
3.1. Pojęcie skrawalności.....	39
3.2. Wskaźniki skrawalności	39
3.3. Skrawalność stopów aluminium.....	40
3.3.1. Kształtowanie wiórów	42
3.3.2. Jakość powierzchni	44
3.3.3. Zużycie narzędzi	45
3.3.4. Siły skrawania.....	48
3.4. Skrawalność stopów magnezu	52
3.5. Czynniki wpływające na skrawalność stopów magnezu	53
3.6. Skrawalność stopów magnezu w warunkach obróbki konwencjonalnej i HSC	54
Literatura.....	68

4. Modelowanie matematyczne procesu skrawania (<i>Kazimierz Zaleski, Rafał Rusinek</i>).....	75
4.1. Rodzaje drgań w procesie skrawania	75
4.2. Przyczyny drgań samowzbudnych	76
4.3. Modele procesu skrawania	78
4.4. Model skrawania ortogonalnego	79
4.5. Model frezowania	80
Literatura.....	85
5. Dynamika skrawania stopów aluminium i magnezu w warunkach konwencjonalnych i HSM (<i>Kazimierz Zaleski, Rafał Rusinek</i>)	87
5.1 Skrawanie konwencjonalne a HSM.....	87
5.2. Badania doświadczalne	88
5.2.1. Frezowanie stopów magnezu	88
5.2.2. Frezowanie stopów aluminium	91
5.3. Ocena stabilności obróbki stopów aluminium i magnezu.....	94
5.3.1. Analiza pomiarów siły skrawania stopu AW 7075	95
5.3.2. Analiza pomiarów siły skrawania stopu AlSi20.....	96
5.3.3. Pomiar chropowatości powierzchni stopu AW 7075 i AlSi20	97
5.4. Dynamiczne wskaźniki skrawalności	99
Literatura.....	103
6. Narzędzia do obróbki skrawaniem stopów aluminium i magnezu (<i>Kazimierz Zaleski, Tomasz Pałka</i>).....	105
6.1. Materiałowa i geometryczna charakterystyka narzędzi do skrawania stopów aluminium i magnezu.....	105
6.2. Wpływ geometrii ostrza na siły skrawania podczas frezowania stopów aluminium.....	108
6.3. Wpływ kąta pochylenia linii śrubowej frezu i posuwu na chropowatość powierzchni po frezowaniu	110
6.4. Nowoczesne rozwiązania narzędziowe stosowane w obróbce stopów aluminium i magnezu.....	112
Literatura.....	115
7. Właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej stopów aluminium i magnezu po obróbce skrawaniem (<i>Józef Kuczmazewski, Mariusz Kłonica</i>)	117
Wstęp.....	117
7.1. Metody określania swobodnej energii powierzchniowej (SEP)	119
7.2. Wybrane zagadnienia z teorii adhezji.....	119
7.3. Metodyka badań	120
7.4. Wyniki badań.....	122
7.4.1. Frez pełnowęglkowy.....	122
7.4.2. Frez z płytkami diamentowymi	138

7.5. Wnioski	143
Literatura	144
8. Zasady bezpiecznej obróbki stopów magnezu (<i>Józef Kuczmaszewski, Ireneusz Zagórski</i>)	147
8.1. Zagrożenia podczas obróbki stopów magnezu	147
8.2. Zalecenia do obróbki stopów magnezu	153
Literatura.....	156
9. Chłodzenie i smarowanie w obróbce skrawaniem stopów aluminium i magnezu (<i>Kazimierz Zaleski, Tomasz Pałka</i>)	159
9.1. Rola cieczy obróbkowych w procesie skrawania	160
9.2. Chłodzenie i smarowanie w obróbce stopów aluminium	163
9.3. Chłodzenie i smarowanie w obróbce stopów magnezu	165
Literatura.....	172
10. Obróbka elementów cienkościennych wykonywanych ze stopów aluminium i magnezu (<i>Józef Kuczmaszewski, Paweł Pieško, Ireneusz Zagórski, Maciej Włodarczyk</i>)	175
Literatura.....	191
11. Frezowanie konstrukcji kieszeniowych frezami trzpieniowymi o różnej sztywności (<i>Józef Kuczmaszewski, Paweł Pieško</i>)	193
Literatura.....	207
12. Ustalanie i mocowanie elementów w procesie obróbki (<i>Józef Kuczmaszewski, Maciej Włodarczyk</i>).....	209
12.1. Istota ustalenia i zamocowania elementów lotniczych na obrabiarkach CNC.....	209
12.2. Zasady prawidłowego ustalenia przedmiotów	222
12.3. Zasady wyboru baz i zasady jedności baz	225
12.4. Ważniejsze elementy ustalające i mocujące stosowane przy obróbce CNC	228
12.5. Ustalanie i mocowanie przedmiotów o małej sztywności	237
12.6. Ustalanie i mocowanie przedmiotów wielkogabarytowych.....	240
12.7. Paletyzacja i systemy bazująco-mocujące oparte o stałe punkty zerowe	243
Literatura.....	248
13. Naprężenia własne w warstwie wierzchniej elementów wykonanych ze stopów aluminium i magnezu (<i>Kazimierz Zaleski, Jakub Matuszak</i>)	251
13.1. Znaczenie naprężeń własnych w warstwie wierzchniej elementów maszyn.....	252
13.2. Naprężenia własne w przedmiotach obrabianych skrawaniem.....	257

13.3. Naprężenia własne w przedmiotach obrabianych nagniataniem i szczotkowaniem	260
Literatura.....	264
14. Obróbka krawędzi w konstrukcjach wykonanych ze stopów aluminium i magnezu (Kazimierz Zaleski, Jakub Matuszak).....	267
14.1. Formowanie zadziorów w obróbce skrawaniem	267
14.2. Stan krawędzi przedmiotów	274
14.3. Przegląd metod usuwania zadziorów	276
14.4. Obróbka szczotkowaniem jako metoda usuwania zadziorów i kształtowania krawędzi	279
14.5. Obróbka krawędzi metodą szczotkowania w konstrukcjach wykonanych ze stopów aluminium i magnezu	281
Literatura.....	288
15. Perspektywy rozwoju obróbki skrawaniem stopów aluminium i magnezu (Kazimierz Zaleski)	291
Literatura	293
Zakończenie	295
Spis rysunków.....	297

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

A	– wydłużenie
a_e	– szerokość skrawania
a_p	– głębokość skrawania
CAD	– komputerowe wspomaganie projektowania
CAM	– komputerowe wspomaganie wytwarzania
CCS	– ciecz chłodząco-smarująca
CNC	– komputerowe sterowanie numeryczne
CTS	– chłodzenie przez wrzeciono
F	– siła całkowita
F_c	– główna siła skrawania
F_f	– siła posuwowa
F_p	– siła odporowa
f_z	– posuw na ostrze
g_s	– grubość ścianki
HPC	– obróbka wysokowydajna
HSC	– skrawanie szybkościowe
HSM	– obróbka szybkościowa
j	– sztywność
M_c	– moment skrawania
MES	– metoda elementów skończonych
MQL	– obróbka z minimalnym smarowaniem
n	– prędkość obrotowa
OUPN	– obrabiarka uchwyt przedmiot narzędzie
PKD	– polikrystaliczny diament
PO	– przedmiot obrabiany
Ra	– średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości

R_e	– granica plastyczności
R_m	– wytrzymałość na rozciąganie
R_z	– największa wysokość profilu
SEM	– mikroskopia skaningowa
SEP	– swobodna energia powierzchniowa
t	– czas
UMST	– układ masowo-sprężysto-tłumiący
v_c	– prędkość skrawania
v_f	– prędkość posuwu
WS	– warstwa skrawana
Z	– przewężenie
z	– liczba ostrzy skrawających
α	– kąt przyłożenia
γ	– kąt natarcia
λ_s	– kąt pochylenia
Φ	– kąt wyjścia
Ω	– prędkość kątowna

Wstęp

Stopy aluminium i magnezu to grupa materiałów zajmująca ważne miejsce w budowie maszyn i nowoczesnej inżynierii materiałowej. Trudno dzisiaj wyobrazić sobie nowoczesne konstrukcje, w bardzo wielu branżach, bez znaczącego udziału tych materiałów. Stopy aluminium stanowią ważny materiał konstrukcyjny w przemyśle maszynowym, transporcie, w tym w lotnictwie, budownictwie, przemyśle AGD, energetyce i innych. Stopy magnezu, dzięki unikatowym właściwościom wzbudzają także zainteresowanie telekomunikacji, przemysłu komputerowego, motoryzacji.

Wzrost zastosowań tych materiałów w tak wielu branżach implikuje potrzebę rozwoju nowoczesnych metod kształtowania tych materiałów, a także doskonalenia metod znanych i tradycyjnych, zwłaszcza w aspekcie poprawy efektywności tego kształtowania.

Obróbka skrawaniem jest przykładem technologii tradycyjnej, znanej i stosowanej od wielu lat, ale ciągle doskonalonej i rozwijanej. Rozwój ten jest szczególnie obserwowany w ostatnich dziesięcioleciach i wynika przede wszystkim z rozwoju maszyn technologicznych sterowanych numerycznie, a także postępu w rozwoju przemysłu narzędziowego. Nowoczesne centra obróbkowe, umożliwiające obróbkę w kilku osiach, także elementów o znacznych rozmiarach umożliwiają zmianę „filozofii” wytwarzania. Najkrócej sprowadza się ona do produkcji elementów integralnych w miejsce montowanych z wielu elementów. W konsekwencji, w niektórych przypadkach, ponad 90% masy półfabrykatu zostaje zamieniona w wióry. Taka obróbka musi być prowadzona z odpowiednią efektywnością, koszty pracy są kluczową pozycją w kosztach wytwarzania.

W takiej sytuacji szczególnie ważne są badania dotyczące poprawy efektywności wytwarzania, przy zachowaniu przewidzianej warunkami technicznymi jakości.

Z reguły nowoczesne konstrukcje, zwłaszcza w przemyśle lotniczym, są w możliwie największym stopniu „odchudzone”. W takich sytuacjach ważna jest odpowiednia strategia obróbki, elementy cienkościenne powinny być obrabiane z uwzględnieniem ich podatności, a także stabilności procesu w aspekcie dynamicznym.

W monografii zawarto najnowsze wyniki badań dotyczących obróbki stopów aluminium i magnezu, zwłaszcza w aspekcie ich zastosowań w przemyśle

lotniczym. Badania koncentrowały się przede wszystkim na efektach procesu, prowadzonego w bardziej intensywnych warunkach, w stosunku do aktualnie prowadzonych w przemyśle. Wykonano wiele symulacji numerycznych, następnie weryfikowanych w warunkach rzeczywistych. Wyniki badań własnych przedstawiono na tle najnowszych badań prowadzonych w innych krajowych i zagranicznych ośrodkach naukowych.

Zasadnicza część pracy jest efektem kilkuletnich badań w ramach projektu kluczowego „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka. Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

1. Aluminium i jego stopy

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 żelazie, 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 Al o parametrze 0,40408 nm i nie wykazuje odmian alotropowych. Jego temperatura topnienia wynosi 660,37°C, a gęstość jest równa $\rho=2,6989 \text{ g/cm}^3$ w temperaturze 20°C, ok. 3 razy mniej niż żelazo, co jest szczególnie istotne dla konstrukcji lotniczych. Ponadto stopy aluminium, w porównaniu ze stalami, cechują się wyższą uduronością w niskiej temperaturze [3, 11]. Aluminium w stanie wyżarzone posiada wytrzymałość na rozciąganie równą $R_m=70\div 120\text{MPa}$, granicę plastyczności $R_e=20\div 40\text{MPa}$, wydłużenie $A_{113}=30\div 45\%$ i przewężenie $Z = 80\div 95\%$. Jest stosunkowo łatwe zarówno do obróbki ubytkowej jak i plastycznej. Plastycznie może być kształtowane na zimno i na gorąco. Przy zgnioście 60÷80% jego wytrzymałość na rozciąganie osiąga $R_m=140\div 230\text{MPa}$, granica plastyczności $R_e=120\div 180\text{MPa}$, twardość 40÷60HB, przy wydłużeniu $A_{113}=1,5\div 3\%$. Dzięki cienkiej warstwie Al_2O_3 , która chroni go przed dalszym utlenianiem, jest odporne na korozję.

W przyrodzie nie występuje jako czysty pierwiastek lecz jedynie w związkach z tlenem i kwasem krzemowym [11].

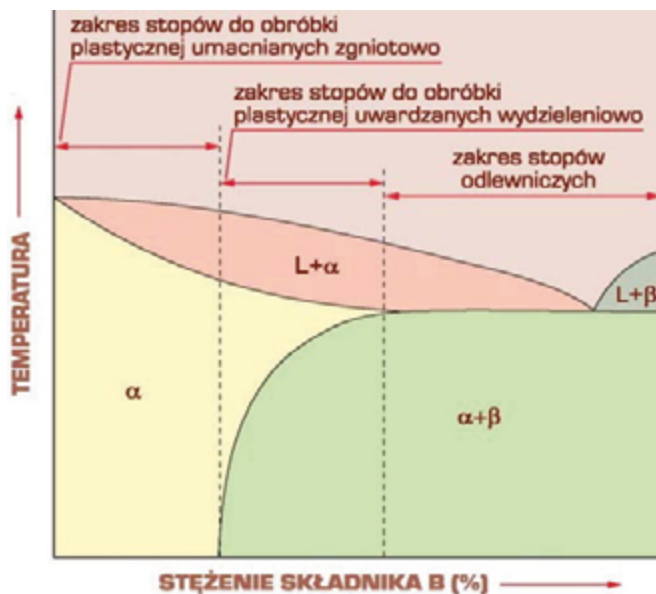
Aluminium cechuje wysoka przewodność elektryczna – 37,74 MS/m, stanowiąca ok. 65% przewodności elektrycznej miedzi, oraz dobra przewodność cieplna. Domieszki powodują obniżenie przewodności elektrycznej oraz plastyczności, lecz zwiększają wytrzymałość [1, 2, 11].

Aluminium i jego stopy są stosowane jako:

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

Niektóre ze stopów mogą być stosowane jako odlewnicze jak i przeznaczone do przeróbki plastycznej. Stopy do przeróbki plastycznej dzielą się na stopy

nieobrabiane ciepnie tzn. w stanie umocnienia zgniotem oraz stopy obrabiane ciepnie poprzez utwardzanie wydzieleniowe. Zawartość pierwiastków stopowych w stopach nieobrabianych ciepnie jest niższa od granicznej rozpuszczalności w aluminium w temperaturze otoczenia (rys. 1.1) [1, 2, 11].



Rys. 1.1. Fragment typowego wykresu równowagi stopów Al z zaznaczeniem zakresów stężenia stopów do przeróbki plastycznej, umacnianych przez zgniot i utwardzanych wydzieleniowo, oraz stopów odlewniczych [2]

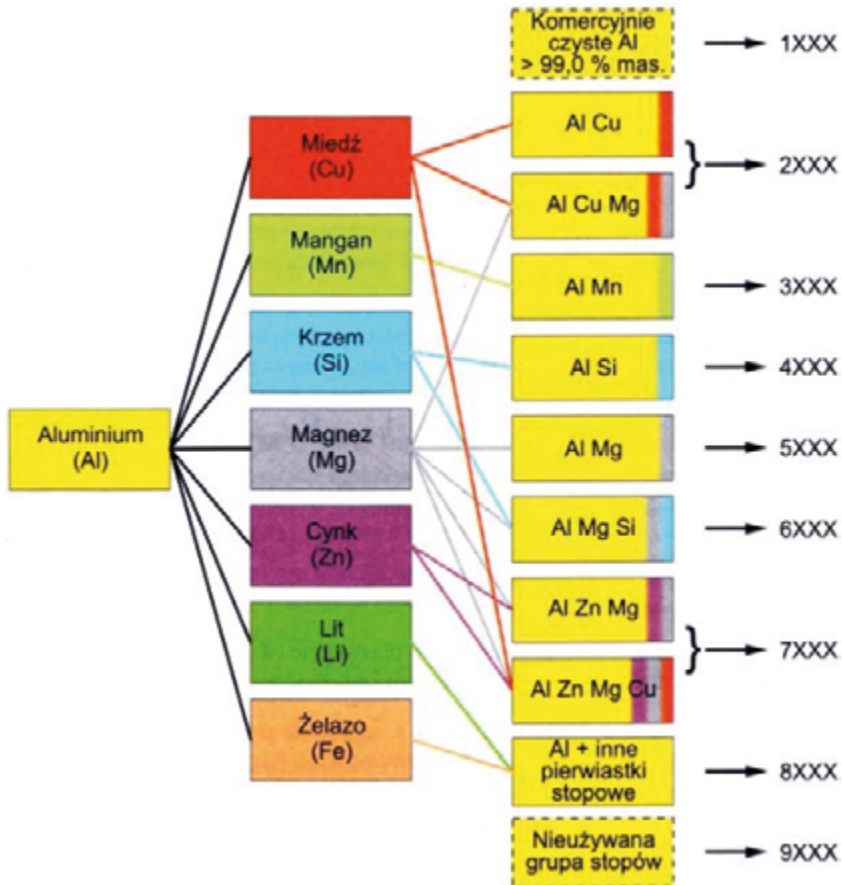
1.1. Aluminium

Proces wytwarzania aluminium hutniczego jest dosyć skomplikowany i energochłonny. W procesie Bayera z rud boksytu wytwarza się tlenek aluminium Al_2O_3 , który następnie poddaje się redukcji elektrolitycznej w stopionym kriolicie. W celu uzyskania większej czystości otrzymane w ten sposób aluminium jest 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% [8]. Sposób oznaczenia gatunków aluminium podano w normach PN-EN 515-1:1996 i PN-EN 573-1:2006 [6, 7]. Oznaczenie gatunku aluminium składa się ze znaków EN AW-Al oraz liczby wyrażającej jego czystość. Niekiedy dodaje się symbol pierwiastka stanowiącego niewielką domieszkę, np. EN AW-Al99,0Cu. W oznaczeniu gatunków do zastosowań elektrycznych symbol Al poprzedzony jest literą E, np. EN AW-EAl99,5. Czyste technicznie aluminium (ok. 99,5% Al.) stosowane jest na przewody elektryczne, urządzenia przemysłu

spożywczego, wymienniki ciepła, opakowania artykułów spożywczych czy aparaturę chemiczną. Znacznie szersze zastosowanie posiadają stopy aluminium [1, 2, 11].

1.2. Stopy aluminium do przeróbki plastycznej

Stopy do przeróbki plastycznej zawierają z reguły do ok. 5–6 % pierwiastków stopowych, którymi są najczęściej Cu, Mg, Mn, a także Si, Zn, Ni, Cr, Ti lub Li. Klasyfikację stopów aluminium ze względu na skład chemiczny przedstawiono na rys.1.2. 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 [6, 11]. 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.1.2).



Rys. 1.2. Podział stopów aluminium do przeróbki plastycznej [8, 11]

Stopy nieobrabiane 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 przeróbki plastycznej na zimno w połączeniu z utwardzeniem wydzieleniowym (stopy Al-Mn) i/lub umocnieniem roztworowym (stopy Al-Mg). Mogą być dostarczane w stanie wyżarzonym lub umocnionym zgniotem (tabela 1.1) [2, 11].

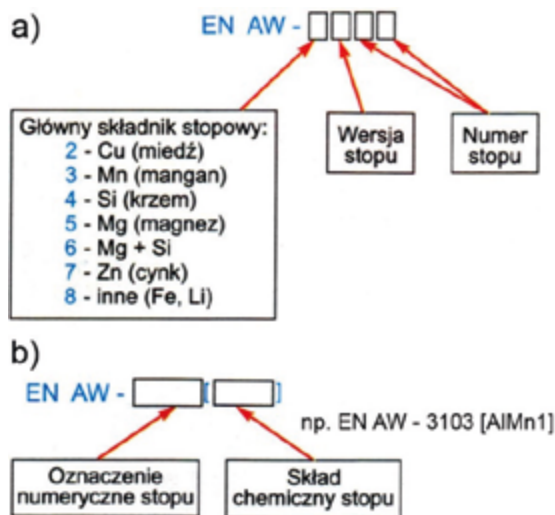
Stopy obrabiane cieplnie uzyskują wytrzymałość dzięki utwardzaniu wydzieleniowemu, które jest połączeniem przesykania i starzenia. Przesykanie polega na nagraniu stopu do temperatury wyższej o ok. 30÷50°C od temperatury granicznej rozpuszczalności w celu rozpuszczenia faz międzymetalicznych, wygrzaniu 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 zwiększających twardość i wytrzymałość stopu przy jednoczesnym obniżeniu plastyczności [2, 11]. W tabeli 1.1 przedstawiono sposób oznaczenia stanu stopów aluminium.

Tabela 1.1. System oznaczania stanu stopów aluminium [6, 11]

Oznaczenie	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 przeróbce plastycznej na zimno po wyżarzeniu lub po przeróbce plastycznej na gorąco, lub kombinacji przeróbki 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,

Oznaczenie	Stan podstawowy wyrobu
H	<p>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:</p> <p>Hx2 – wytrzymałość na rozciąganie w przybliżeniu w połowie między stanem O i stanem Hx4 (1/4 twardości),</p> <p>Hx4 – wytrzymałość na rozciąganie w przybliżeniu między stanem O i Hx8 (1/2 twardości),</p> <p>Hx6 – wytrzymałość na rozciąganie w przybliżeniu w połowie między stanem Hx4 i Hx8 (3/4 twardości),</p> <p>Hx8 – stan pełnej twardości, określany na podstawie minimalnej wytrzymałości na rozciąganie stopu w stanie wyżarzonym. Cyfry 1, 3, 5, 7 oznaczają stany pośrednie.</p>
W	<p>Przesycony – stosowany do stopów, które po przesyceniu są samoczynnie (naturalnie) starzone w temperaturze pokojowej</p>
T	<p>Obrobiony cieplnie do uzyskania stabilnych stanów innych niż F, O lub H.</p> <p>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,</p> <p>T2 – schłodzony z podwyższonej temperatury procesu kształtowania, odkształcony na zimno i naturalnie starzony do uzyskania stabilnego stanu; zwykle kojarzony z odlewami,</p> <p>T3 – przesycony, odkształcony na zimno i naturalnie starzony do uzyskania stabilnego stanu,</p> <p>T4 – przesycony i naturalnie starzony do uzyskania stabilnego stanu,</p> <p>T5 – schłodzony z podwyższonej temperatury procesu kształtowania, a następnie sztucznie starzony; zwykle kojarzony z wyrobami wciskany z grupy 6xxx,</p> <p>T6 – przesycony a następnie sztucznie starzony,</p> <p>T7 – przesycony i przestarzony/stabilizowany,</p> <p>T8 – przesycony, odkształcony na zimno i sztucznie starzony,</p> <p>T9 – przesycony, sztucznie starzony i odkształcony na zimno,</p> <p>T10 – schłodzony z podwyższonej temperatury procesu kształtowania, odkształcony na zimno i sztucznie starzony.</p>

Sposób oznaczania stopów aluminium do przeróbki plastycznej zgodnie z normami PN-EN 515-1:1996 i PN-EN 573-1:2006 przedstawiono na rys. 1.3 [6, 7]. W oznaczeniach według składu chemicznego, liczby, występujące po symbolach pierwiastków, określają średnie nominalne stężenie danego składnika stopu. Po oznaczeniu stopu podaje się symbol stanu przeróbki plastycznej lub cieplnej (tabela 1.1).



Rys. 1.3. Oznaczenie stopów aluminium do przeróbki plastycznej: a) numeryczne, b) według składu chemicznego [6, 7, 11]

Poniżej scharakteryzowano podstawowe właściwości i zastosowania poszczególnych grup stopów aluminium do przeróbki plastycznej [2, 4, 11, 12]:

- **Stopy aluminium z miedzią i magnezem (grupa 2xxx)**

W praktyce stosowanych jest niewiele dwuskładnikowych stopów Al-Mg. Zastosowanie w tego typu stopach niewielkich dodatków Pb i Bi polepsza ich skrawalność ułatwiając proces tworzenia wiórów. Stopy z dodatkiem Mn, Zr i Ti cechuje duża wytrzymałość na rozciąganie oraz pełzanie w podwyższonej temperaturze, a także wysoka odporność na obciążenia dynamiczne w niskiej temperaturze. Dzięki tym cechom oraz dobrej spawalności stosowane są na zbiorniki paliwa pocisków rakietowych oraz statków kosmicznych. Stopy aluminium z Cu i Mg z dodatkiem Mn albo Fe, lub Si nazywane są *duraluminium* lub *duralami miedziowymi*. Zwiększenie stężenia Cu oraz Mg powoduje podwyższenie właściwości wytrzymałościowych i zmniejszenie właściwości plastycznych oraz podatności durali na obróbkę plastyczną. Stopy Al z Cu i Mg są poddawane obróbce cieplnej polegającej na wyżarzaniu ujednorodniającym, rekrytalizującym i przede wszystkim na utwardzaniu wydzieleniowym. Przesycanie odbywa się w temperaturze ok. 490÷510°C natomiast starzenie może być naturalne lub sztuczne w temperaturze 170÷190°C. Właściwości wytrzymałościowe durali miedziowych można zwiększyć przez obróbkę plastyczną na zimno ze stopniem zgniotu 3÷5%, wykonywaną zwykle po starzeniu samorzutnym. Durale miedziowe są stosowane na elementy maszyn, pojazdów mechanicznych, taboru kolejowego, samolotów, a także w budownictwie. Ich zastosowanie jest jednak ograniczone z powodu obniżonej odporności na korozję.

- **Wieloskładnikowe stopy aluminium z miedzią (grupa 2xxx)**

Wieloskładnikowe stopy Al-Cu zawierające – oprócz Mg, Si i Mn – także Fe, Ni, Ti, Zr lub Li cechują się dobrymi właściwościami mechanicznymi zarówno w temperaturze pokojowej jak i podwyższonej. Wysoka żarowytrzymałość jest związana z tworzeniem się faz bogatych w Fe, Mn lub Ti. Ponadto dodatek Ti sprzyja powstawaniu drobnoziarnistej struktury stopu, natomiast Mn ułatwia rekrytalizację. Cechują się one również dobrą odpornością na korozję. Obróbka cieplna tych stopów polega na wyżarzaniu rekrytalizującym po zgnioście na zimno oraz na utwardzaniu wydzieleniowym. Przesycanie odbywa się w temperaturze 510-540°C, natomiast starzenie w temperaturze 160-200°C. Żarowytrzymałe stopy aluminium są stosowane na elementy wytwarzane głównie metodą kucia matrycowego, eksploatowane w temperaturze do około 350°C, w szczególności na elementy konstrukcji lotniczych, środków transportu i maszyn. Właściwości mechaniczne tych stopów w temperaturze pokojowej są niższe od właściwości durali miedziowych. Z tego względu należy unikać stosowania wieloskładnikowych stopów Al-Cu na elementy konstrukcyjne eksploatowane wyłącznie w temperaturze pokojowej.

- **Stopy aluminium z manganem (grupa 3xxx)**

Stopy Al z Mn zawierają zwykle 1,0÷1,5% Mn oraz dodatek Mg lub Cu. Wykazują one tendencję do gruboziarnistości i segregacji strefowej, czemu zapobiega się stosując niewielkie dodatki Ta, Ti, Zr lub B. Obróbka cieplna stopów aluminium z manganem polega na wyżarzaniu ujednorodniającym i rekrytalizującym. Dzięki dobrej odporności na korozję stopy aluminium z manganem znajdują zastosowanie na elementy eksploatowane w agresywnych ośrodkach korozyjnych, w szczególności na urządzenia produkcyjne i transportowe w przemyśle spożywczym i chemicznym, a także spawane zbiorniki na ciecze i gazy techniczne oraz inne elementy spawane lub zgrzewane.

- **Stopy aluminium z krzemem (grupa 4xxx)**

Niektóre stopy Al z niewielkim dodatkiem krzemu (do ok. 2%) mogą być poddawane obróbce plastycznej. Stosuje się je na średnio obciążone elementy konstrukcji lotniczych i pojazdów mechanicznych oraz elementy głębokotłoczne i kute o złożonym kształcie.

- **Stopy aluminium z magnezem (grupa 5xxx)**

Stopy Al-Mg do przeróbki plastycznej, zwane zwyczajowo *hydronaliami*, zawierają 0,4÷5,6% Mg, a także niewielki dodatek Mn, niekiedy Si, Cr, Fe lub Pb. Charakteryzują się podwyższonymi właściwościami mechanicznymi, odpornością na korozję, dobrą spawalnością oraz podatnością na głębokie umocnienie przez zgniot. Poddaje się je wyżarzaniu ujednorodniającemu, rekrytalizującemu oraz odprężającemu. Stopy Al-Mg znajdują zastosowanie na średnio obciążone elementy w przemyśle okrętowym i lotniczym oraz w urządzeniach przemysłu spożywczego i chemicznego. Stosowane są też na opakowania artykułów spożywczych.

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

W stopach Al-Mg-Si stosuje się dodatek Mg i Si w proporcji 1,73:1 lub większe niż wymagane do utworzenia Mg_2Si – stężenie Si, co ułatwia utwardzenie wydzieleniowe. 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, rzadziej na blachy czy płyty. Mogą być stosowane w stanie wyżarzonym, a w celu poprawy właściwości mechanicznych poddawane utwardzaniu wydzieleniowemu.

Stopy o zrównoważonej, łącznej zawartości Mg i Si na poziomie 0,8-1,2% charakteryzują się dobrą plastycznością oraz przeciętną wytrzymałością, którą poprawia zwiększenie zawartości Mg i Si powyżej 1,4% oraz przeprowadzane po obróbce plastycznej przesycanie i sztuczne starzenie. Stopy ze zwiększoną zawartością Si są lepiej utwardzane wydzieleniowo, przy zmniejszonej plastyczności. Stopy Al-Mg-Si stosowane są głównie jako wypraski oraz odkuwki, do wytwarzania elementów sprzętu transportowego, rowerów, elementów architektonicznych oraz konstrukcji spawanych.

- **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. W stanie utwardzonym wydzieleniowo ich wytrzymałość na rozciąganie R_m osiąga ok. 700 MPa, a granica plastyczności $R_{p0,2}$ – ok. 600 MPa, przy małym wydłużeniu $A = 2-5\%$. Ograniczenie ich stosowania jest związane z małą odpornością na działanie podwyższonej temperatury oraz korozję, w szczególności naprężeniową. Są wytwarzane w postaci blach, prętów, odkuwek i kształtowników. Niektóre stopy aluminium z cynkiem można też stosować jako odlewnicze. Obróbka cieplna durali cynkowych polega na wyżarzaniu rekrytalizującym w temperaturze $390\div 430^\circ C$ oraz na utwardzaniu wydzieleniowym. Przesycanie wykonuje się w temperaturze $465\div 480^\circ C$. Natomiast starzenie w temperaturze $120\div 150^\circ C$. Durale cynkowe są szeroko stosowane do wytwarzania różnych elementów maszyn, pojazdów mechanicznych, taboru kolejowego, a także elementów konstrukcji lotniczych.

- **Stopy aluminium z żelazem (grupa 8xxx)**

Przeznaczone do przeróbki plastycznej stopy aluminium z żelazem zawierają $0,4\div 2,0\%$ Fe oraz dodatek Mn lub Si. Struktura, obróbka cieplna, właściwości i zastosowanie tych materiałów są podobne do stopów Al-Mn.

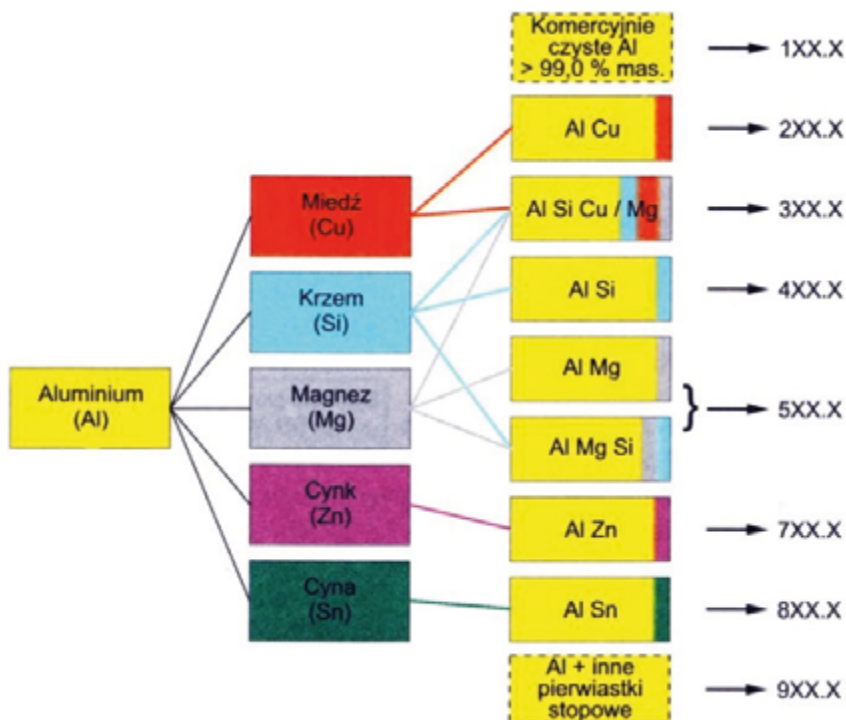
- **Wieloskładnikowe stopy aluminium z litem (grupy 2xxx i 8xxx)**

W stopach Al-Li lit jest stosowany w stężeniu $1,9\div 2,7\%$, pozostałe dodatki to najczęściej Cu oraz Mg. Zmniejszają one rozpuszczalność w roztworze stałym a w konsekwencji zwiększają umocnienie wydzieleniowe. Niewielki dodatek Zr sprzyja rozdrobnieniu ziaren i tworzeniu faz międzymetalicznych. Wytwarzanie stopów Al z Li wymaga stosowania specjalnych metod metalurgicznych, ze względu-

du na bardzo dużą reaktywność litu z tlenem. Ponieważ lit powoduje zwiększenie właściwości wytrzymałościowych przy jednoczesnym zmniejszeniu gęstości stopów Al, stopy te są stosowane przede wszystkim do wytwarzania elementów nowoczesnych samolotów (m.in. elementy konstrukcji nośnych i poszycia) oraz statków kosmicznych (zbiorniki paliwa).

1.3. Odlewnicze stopy aluminium

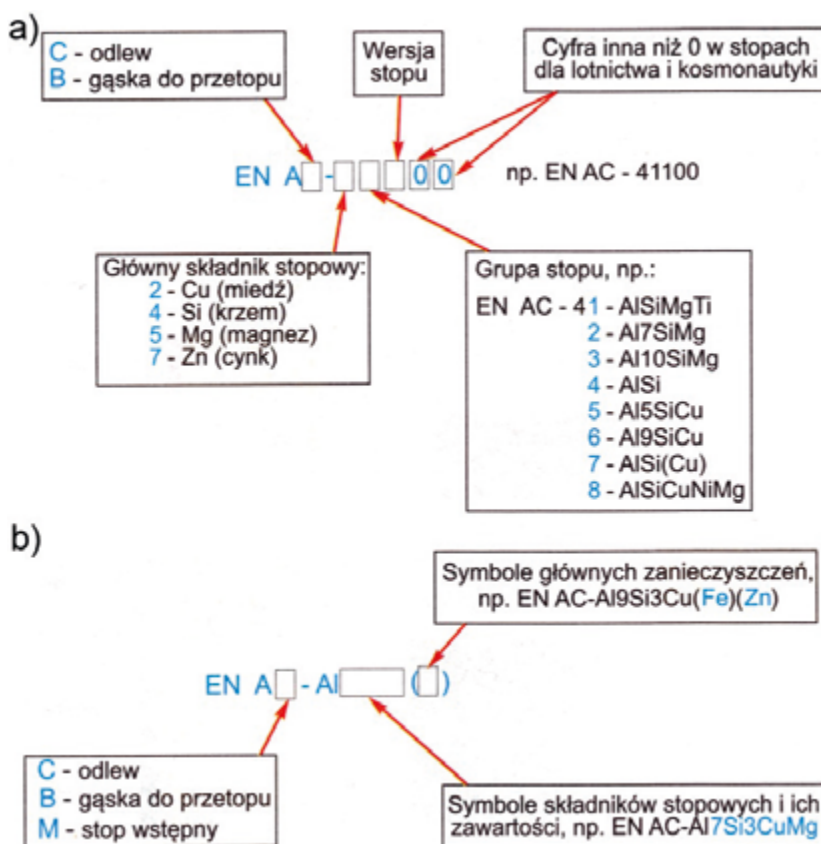
Odlewnicze stopy aluminium zawierają duże stężenie (od 5 do 25%) pierwiastków stopowych, głównie Cu, Si, Mg, Zn i Sn (rys.2.4). Są to przeważnie stopy wieloskładnikowe, charakteryzujące się dobrą lejninością, wypełnieniem formy oraz często małym skurczem odlewniczym. Niekiedy stosuje się do odlewania stopy zawierające mniej niż 5% pierwiastków stopowych. Klasyfikację odlewniczych stopów aluminium przedstawiono na rys.1.4.



Rys. 1.4. Podział odlewniczych stopów aluminium [11]

Sposób oznaczania stopów odlewniczych zgodnie z normami PN-EN 1780-1:2004 i PN-EN 1780-2:2004 przedstawiono na rys. 1.5. [9, 10]. Po znaku EN AC-

-Al podaje się symbole głównego dodatku stopowego oraz jego średnie nominalne stężenie, a następnie symbole i stężenie drugorzędnych dodatków stopowych, np. EN AC- AlSi5Cu3Mn . Znak stopu może być uzupełniony symbolem sposobu odlewania (S – do form piaskowych, K – kokilowych, D – pod ciśnieniem, L – metodą wytapianych modeli) oraz rodzaju obróbki cieplnej.



Rys. 1.5. Oznaczenie odlewniczych stopów aluminium: a) numeryczne, b) według składu chemicznego [6, 7, 11]

Poniżej scharakteryzowano podstawowe właściwości i zastosowania poszczególnych grup odlewniczych stopów aluminium [2, 4, 11, 12]:

- **Stop aluminium z miedzią (grupa 2xx.x)**

Stopy Al-Cu zawierają z reguły do ok. 5% Cu, niekiedy dodatek Ti, wpływający na rozdrobnienie ziaren i zwiększenie lejułości. Są stosowane rzadziej niż stopy Al z krzemem czy magnezem ze względu na mniejszą plastyczność i lejułość oraz podatność na pękanie podczas odlewania. Dodatek Cu zwiększa twardość, wytrzymałość oraz żaroodporność, pogarsza jednak odporność na korozję. W celu

umocnienia stopów Al-Cu poddaje się je utwardzaniu wydzieleniowemu, co pozwala na osiągnięcie wytrzymałości na rozciąganie $R_m = 210$ MPa, twardości 60 HB przy wydłużeniu $A = 6\%$. Stopy te stosuje się na średnio i bardzo obciążone elementy maszyn (m.in. samolotów i samochodów) takie jak: głowice, cylindry i tłoki silników benzynowych i Diesla, eksploatowane w podwyższonych temperaturach, wirniki turbin i sprzężarek doładowujących, korbowody, korpusy pomp, wahacze oraz elementy podwozi samolotowych.

- **Stopy aluminium z krzemem i miedzią (grupa 3xx.x)**

Są wieloskładnikowymi stopami odlewniczymi najczęściej stosowanymi w praktyce. Krzem poprawia lejność i zmniejsza kruchość na gorąco. Dodatek miedzi zwiększając wytrzymałość, obniża odporność na korozję, czemu zapobiega się stosując domieszki niklu. Stopy Al-Si-Cu posiadają dobrą lejność, odporność na ścieranie oraz skrawalność, przy małej plastyczności. Dzięki dodatkowi Cu i Mg stopy te można obrabiać cieplnie, co zwiększa ich wytrzymałość. Wykonuje się z nich różne elementy w przemyśle samochodowym i lotniczym, m.in.: głowice i bloki cylindrowe, skrzynie korbowe, tłoki silników benzynowych i Diesla, koła pasowe, części pomp, klocki hamulcowe i inne.

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

Odlewnicze stopy Al z Si zwane siluminami zawierają 2÷30% (najczęściej 5÷13,5%) krzemu. Dzięki dużej zawartości krzemu stopy te charakteryzują się dobrą lejnością oraz małym skurczem odlewniczym. Ponadto cechuje je wysoka odporność na korozję i ścieranie. Siluminy o składzie eutektycznym (ok. 12,6% Si) posiadają bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe i odlewnicze oraz nie wykazują skłonności do pękania na gorąco. Siluminy mogą być również stopami wieloskładnikowymi z dodatkami Cu, Mg i Mn, które zwiększają ich wytrzymałość. Siluminy wykazują znaczną żarowytrzymałość i odporność na korozję. Są stosowane na wysoko obciążone tłoki silników spalinowych. Ze stopów pondeutektycznych wytwarza się silnie obciążone elementy dla przemysłu okrętowego i elektrycznego, eksploatowane w podwyższonej temperaturze i w wodzie morskiej. Wieloskładnikowe stopy Al z Si są stosowane m.in. na głowice silników spalinowych oraz inne odlewy w przemyśle maszynowym.

- **Stopy aluminium z magnezem (grupa 5xx.x)**

W stopach Al-Mg stężenie Mg zawiera się przedziale od 0,5 do ok. 13%. Stopy o małym stężeniu Mg wykazują dużą podatność na obróbkę plastyczną, a o dużym stężeniu bardzo dobre właściwości odlewnicze. Są, zaraz po siluminach, najczęściej stosowanymi stopami odlewniczymi, wykazują bowiem przy najmniejszej gęstości największą odporność na korozję. Stopy Al-Mg zawierają zwykle niewielkie ilości dodatków stopowych takich jak: Si, Mn, Cr, Zn, Ti, Be lub Li. Odlewnicze stopy Al-Mg znajdują zastosowanie na elementy silnie obciążone i narażone na uderzenia o dużej odporności na korozję, np. na armaturę morską, elementy aparatury chemicznej.

- **Stopy aluminium z cynkiem (grupa 7xx.x)**

Stopy te zawierają do 8,0% Zn oraz dodatek Mg i mogą być obrabialne cieplnie. Posiadają dużą odporność na korozję oraz dobrą skrawalność i stabilność wymiarową, lecz słabe właściwości odlewnicze. Nie nadają się do stosowania w podwyższonej temperaturze, gdyż ulegają „przestarzeniu”. Stosowane są szczególnie na odlewy o kształtach trudnych do przesycania. Znajdują zastosowanie do wytwarzania elementów maszyn, pojazdów oraz konstrukcji lotniczych.

- **Stopy aluminium z cyną (grupa 8xx.x)**

Dodatek Sn w tych stopach nie przekracza 20%. Stopy Al-Sn posiadają dobrą zdolność do przenoszenia obciążeń oraz skrawalność, dobre właściwości ślizgowe i odporność na ścieranie przy stosunkowo małej wytrzymałości. Stosowane są głównie do wyrobu łożysk ślizgowych.

Elementy ze stopów aluminium wytwarzane mogą być również metalurgią proszków. Charakteryzują się one lepszymi właściwościami mechanicznymi w podwyższonej temperaturze, wysoką wytrzymałością zmęczeniową, bardzo dobrą skrawalnością i zwiększoną odpornością na korozję.

Innym przykładem zastosowania stopów aluminium jest tzw. pianoaluminium. Jest ono otrzymywane na drodze spieniania wyprasek proszkowych lub ciekłych metali. Cechy tego typu materiału, takie jak duża sztywność przy małej masie, tłumienie akustyczne i ciepłne oraz duża zdolność do absorpcji energii, sprawiają, że jest on szczególnie przydatny w budowie lekkich konstrukcji stosowanych w samochodach, lotnictwie, aeronautyce, itp. Dzięki dużej zdolności do absorpcji energii i stabilizacji otaczającej struktury powłokowej, pianoaluminium coraz częściej stosowane jest do wytwarzania płyt warstwowych typu *sandwich*.

Stopy aluminium, pomimo stosowania coraz nowszych materiałów takich jak np. kompozyty, są i prawdopodobnie nadal będą jednym z podstawowych materiałów konstrukcyjnych. Świadczy o tym stale zwiększająca się liczba wytwarzanych nowych gatunków stopów Al. Szczególnie obiecująca wydaje się możliwość użycia stopów Al-Li, które przy zmniejszonej gęstości posiadają lepsze właściwości wytrzymałościowe.

1.4. Ważniejsze grupy asortymentowe półfabrykatów ze stopów aluminium

Stopy aluminium do przeróbki plastycznej są oferowane w bardzo wielu postaciach. Są to najczęściej [5, 13]:

- zimno i gorącowałcowane blachy oraz płyty o grubościach od 0,5 do 300 mm;
- taśmy aluminiowe w kręgach, wykorzystywane m.in. na pokrycia dachów, do wykonywania elewacji, parapetów, drzwi, okien, tablic rejestracyjnych, przy produkcji karoserii samochodowych, elementów samolotów a także w przemyśle spożywczym do produkcji opakowań;

- folie aluminiowe;
- wyciskane i ciągnięte pręty o przekroju kwadratowym, prostokątnym i okrągłym o średnicy od 5 mm do 500 mm;
- wyciskane profile zamknięte, tj. rury o przekroju okrągłym, kwadratowym i prostokątnym;
- wyciskane profile i kształtowniki w postaci równomiernych i nierównoramiennych kątowników, ceowników, teowników, dwuteowników, zetowników i inne profile specjalnego przeznaczenia.

Natomiast odlewnicze stopy aluminium najczęściej oferowane są w postaci gąsek do dalszego przetopu.

Literatura

1. Committee A.S.M.I.H.: *ASM Handbook, Volume 02 – Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM International, 2010.
2. Dobrzański L.A.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*. Wydawnictwa naukowo techniczne. Warszawa, 2007.
3. Feld M.: *Obróbka skrawaniem stopów aluminium*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa, 1984.
4. Kopelovich D.: *Wrought aluminium alloys*. www.substech.com /2009.
5. Metale Kolorowe: <http://www.metale-kolorowe.eu/>.
6. Normy, *Polskie Normy: PN-EN 515-1:1996 – Aluminium i stopy aluminium – Wyroby przerobione plastycznie – Oznaczenia stanów 1996*.
7. 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*.
8. Normy, *Polskie Normy: PN-EN 573-3:2010 – Aluminium i stopy aluminium – Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie – Część 3: Skład chemiczny, 2005*.
9. 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*.
10. 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*.
11. Oczó K.E., Kawalec A.: *Kształtowanie metali lekkich*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa, 2012.
12. Polmear I.J.: *Light alloys. From traditional alloys to nanocrystals*. Wydanie czwarte. Elsevier. Amsterdam, 2005.
13. Sebros: <http://www.sebros.eu/aluminium>.

2. Magnez i jego stopy

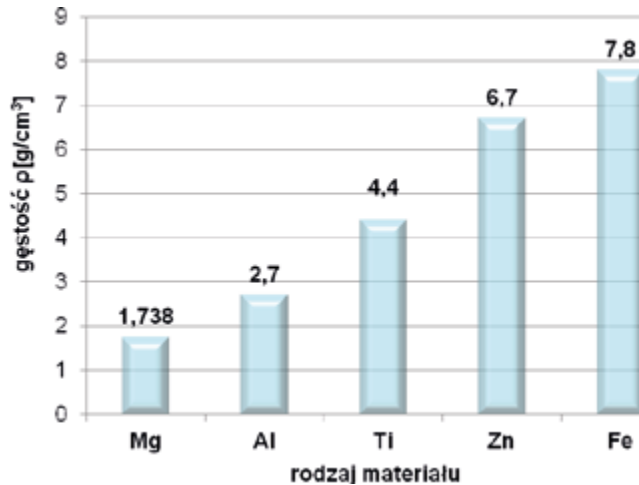
Magnez to jeden z najpospolitszych oraz najpopularniejszych pierwiastków chemicznych. Występuje w skorupie ziemskiej w ilości 2,74%, pod postacią takich minerałów jak: dolomit, magnezyt, kizeryt, oliwin, enstatyt, serpentyn, karnalit. Woda morska zawiera ok. 1,3 kg/m³ (tj. ok. 0,13%) magnezu. Pochodzenie nazwy magnezu pochodzi prawdopodobnie od słowa „Magnesia” oznaczającego miasto w Azji Mniejszej. Związki magnezu, jako pierwszy, badał szkocki fizyk i chemik Joseph Black (1728-1799). Określił on różnice między węglanami wapnia oraz magnezu. W roku 1808 brytyjski chemik Davy Humphrey (1778-1829) wyodrębnił magnez. Na skalę techniczną oraz przemysłową, rozpoczęto produkcję magnezu odpowiednio: we Francji w 1857r. (w tzw. procesie Deville-Caron) oraz w 1940r. w Kanadzie. Polską nazwę „magnez” zaproponował Filip Walter (1810-1847) [8, 20].

2.1. Właściwości fizyczne, chemiczne, technologiczne oraz użytkowe magnezu i jego stopów

Magnez oraz jego stopy są zaliczane, ze względu na swoją gęstość $\rho=1,738 \text{ g/cm}^3$, do grupy metali lekkich. Magnez to srebrzystobiały metal o masie atomowej 24,305 oraz liczbie atomowej 12. Krystalizuje w sieci heksagonalnej zwartej (typ sieci A3 o parametrach $a=0,3209 \text{ nm}$ i $c=0,521 \text{ nm}$, gdzie stosunek parametrów c/a wynosi 1,62 i odpowiada najściślejszemu ułożeniu atomów w sieci). Powyżej temperatury, przyjmowanej umownie jako tzw. punkt zapłonu (tj. powyżej 500°C) magnez oraz jego stopy w stanie rozdrobnionym (małe frakcje wiórów lub opiłków) mogą ulec zapłonowi. Dodatkowo, gdy zostanie osiągnięta temperatura 623°C magnez w postaci rozdrobnionej (najczęściej pył magnezowy) zapala się w powietrzu, ponieważ temperatura zapłonu jest niższa od temperatury topnienia (dla czystego magnezu 650°C), a ponadto temperatura spalania wynosi powyżej 2000°C [7, 18, 19, 20, 32]. Magnez i jego stopy są ok. 35% lżejsze od aluminium i jego stopów. Stopy magnezu są alternatywnym, nowoczesnym materiałem konstrukcyjnym, zamiennym dla stopów Al [22].

W celach porównawczych na rys. 2.1 przedstawiono gęstości różnych materiałów konstrukcyjnych [32]. Łatwo zaobserwować, że zarówno magnez jak i jego stopy są ciekawą alternatywą dla innych metali konstrukcyjnych.

Właściwości wytrzymałościowe i plastyczne czystego magnezu są stosunkowo niskie i zależą od jego czystości. Czysty magnez stosowany jest przede wszystkim jako odtleniacz do innych metali oraz w pirotechnice. Właściwości mechaniczne można jednak poprawić przez wprowadzenie dodatków stopowych.



Rys. 2.1. Porównanie masy właściwej różnych materiałów konstrukcyjnych [32]

W tabeli 2.1 podano różne właściwości mechaniczne, fizyczne, chemiczne oraz cieplne dla czystego Mg. Właściwości fizyczne oraz mechaniczne takie jak: gęstość, ciepło właściwe, wytrzymałość na rozciąganie, umowna granica plastyczności, twardość oraz wydłużenie podano dla warunków temperatury pokojowej.

Tabela 2.1. Podstawowe właściwości czystego magnezu [7, 20]

Właściwości fizyczne i mechaniczne	Symbol	Jednostka	Wartość
Gęstość	ρ	g/cm ³	1,738
Przewodność cieplna	λ	W/(m·°C)	156
Współczynnik rozszerzalności cieplnej (20÷100)°C	α	$\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$	24,8
Ciepło właściwe	C_w	J/(g·°C)	1,02
Temperatura topnienia	T_t	°C	650
Temperatura zapłonu	T_z	°C	~500
Temperatura wrzenia	T_w	°C	1107
Moduł sprężystości wzdłużnej Younga	E	GPa	45

Właściwości fizyczne i mechaniczne	Symbol	Jednostka	Wartość
Moduł sprężystości poprzecznej Kirchhoffa	G	GPa	16
Wytrzymałość na rozciąganie	R _m	MPa	165-210
Umowna granica plastyczności	R _{p0,2}	MPa	70-140
Twardość	HB	-	30-45
Wydłużenie	A	%	2-12
Współczynnik Poissona	ν	-	0,291

Ważnymi cechami nowoczesnych stopów magnezu są [8, 10, 20, 23, 32]:

- dobra osłona elektromagnetyczna,
- niski współczynnik tarcia,
- odporność korozyjna, która może być jeszcze podwyższona poprzez zastosowanie odpowiedniej obróbki pokryciowej,
- brak agresywności w odniesieniu do materiału formy i niewielkie ciepło topnienia,
- zdolność do tłumienia drgań oraz niska bezwładność, umożliwiają zastosowanie stopów magnezu na szybko poruszające się elementy w miejscach, gdzie pojawiają się gwałtowne zmiany prędkości,
- możliwość pełnego recyklingu (w porównaniu do tworzyw polimerowych).

Właściwości mechaniczne odlewniczego stopu AZ91 można w istotny sposób kształtować, poprzez zastosowanie odpowiedniej obróbki cieplnej (T4 – przesycanie, T5 – starzenie, T6 – przesycanie i starzenie). Najwyższymi właściwościami wytrzymałościowymi, a przy tym dobrą plastycznością, charakteryzował się stop w stanie T6 [24]. Podczas wygrzewania odlewów wykonanych ze stopów magnezu, w wysokiej temperaturze zachodzą pewne niekorzystne efekty: gwałtowne utlenianie stopu oraz nadmierny rozrost ziarna. To ostatnie zjawisko jest szczególnie niekorzystne w metalach krystalizujących w układzie heksagonalnym. Aby zapobiec temu zjawisku w najczęściej stosowanym stopie magnezu AZ91, stosuje się specjalną obróbkę cieplną A-T4 (przesycanie zapobiegające rozrostowi ziarna) [25].

2.2. Otrzymywanie magnezu i jego stopów

W produkcji magnezu wykorzystywane są obecnie metody redukcji (silikotermiczne) tlenku magnezu żelazokrzemem (otrzymywanym z rud węglanowych) oraz elektrolizy stopionego bezwodnego chlorku magnezu otrzymywanego z następujących związków chemicznych: magnezytu, wody morskiej lub solanki, serpentynitu i karnalitu.

2.3. Ważniejsze stopy magnezu

Stopy magnezu dzieli się na odlewnicze i do obróbki plastycznej. Właściwości stopów magnezu można modyfikować poprzez dobór odpowiednich dodatków stopowych. Głównymi składnikami stopowymi stopów magnezu są: aluminium (3÷11%), cynk, oraz mangan. Rzadziej stosuje się krzem, cyrkon i metale ziem rzadkich. Spotyka się również stopy magnezu zawierające takie dodatki stopowe, jak: wapń, kadm i nikiel, przy czym zawartość ich zwykle nie przekracza 1%. Osobną, najmłodszą grupę stopów magnezu stanowią stopy z litem (zawierające do kilkunastu % Li) [5, 7, 9, 16, 17, 20].

Aluminium jest najczęściej stosowanym dodatkiem stopowym. Pierwiastek ten podwyższa wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie, twardość, polepsza lejność, zmniejsza skurcz, lecz zwiększa też skłonność do mikroporowatości oraz może powodować niekorzystną kruchość na gorąco. *Cynk* zwiększa wytrzymałość (poprzez utwardzenie wydzieleniowe) i wydłużenie stopów Mg, polepsza również lejność. Wykazuje jednak, jak w przypadku dodatku Al., tendencję do tworzenia mikroporowatości. Zwykle jest dodawany łącznie z Al oraz Mn. *Mangan* – w stężeniu do ok. 0,5% – zwiększa wytrzymałość, poprawia odporność na korozję i umożliwia spawanie stopów magnezu, rozdrabnia wydzielenia oraz zwiększa odporność na pełzanie [7, 8, 20, 23]. Inne dodatki stopowe stosowane przy wytwarzaniu stopów magnezu to: cyrkon (Zr), krzem (Si), metale ziem rzadkich, srebro (Ag), beryl (Be), wapń (Ca), lit (Li), miedź (Cu), itr (Y), tor (Th), cyna (Sn). Lit, ze względu na swoją małą gęstość ($\rho=0,54 \text{ g/cm}^3$), jest pierwiastkiem obniżającym gęstość stopów magnezu. Dotychczas stopy Mg-Li mają ograniczone zastosowanie, co w przeważającej części podyktowane jest dość wysoką ceną tych materiałów. Metale ziem rzadkich są dodawane do stopów magnezu, jako tzw. „mismetal” lub jako „dydym”. „Mismetal” jest naturalną mieszaniną metali ziem rzadkich zawierającą ok. 50% ceru, pozostałą część stanowią głównie lantan i neodym. „Dydym” jest naturalną mieszaniną ok. 85% neodymu i 15% prazeodymu. Do niedawna także tor był składnikiem pewnych grup stopów magnezu, jednak z powodu jego szkodliwego oddziaływania stopy te obecnie są wycofywane z zastosowania [8, 20, 23, 29].

Wieloskładnikowe stopy Mg, zawierające (3÷10)% Al, (1÷3)% Zn oraz dodek Mn, nazywane *elektronami*, są stosowane zarówno na elementy odlewane, jak i w postaci obrobionej plastycznie, przeważnie na gorąco [7]. Popularnym stopem z tej grupy jest stop AZ91 (MgAl9Zn1), stosowany jako stop odlewniczy, na elementy typu obudowa np. przekładni zębatych, wykonywane na potrzeby przemysłu lotniczego, m.in. WSK „PZL Rzeszów” S.A. Stop magnezu o symbolu AZ91HP to stop o wysokiej czystości i odporności na korozję, gdzie HP oznacza High Purity. Stop ten jest stosowany m.in. na odlew korpusu pięciobiegowej przekładni aut firmy Audi. Ponadto stopy o wysokiej czystości wykazują większą

odporność na korozję, w związku z małym stężeniem zanieczyszczeń typu Fe, Ni, Cu [8, 18, 19, 23, 34].

Odlewnicze stopy magnezu zawiera Polska Norma PN-EN 1753:2001, dotychczas były one ujęte w wycofanych normach PN-H-88050:1988, PN-H-88052:1991. System oznaczenia magnezu i jego stopów według składu chemicznego podano w PN-EN 1754:2002. Stopy do obróbki plastycznej zawarto w wycofanej bez zastąpienia Normie PN-H-88051:1964. Pomimo korzystnych właściwości mechanicznych zastosowanie stopów magnezu przeznaczonych do obróbki plastycznej stanowi zaledwie 1% rocznej produkcji magnezu na świecie [35], co jest związane z ograniczoną plastycznością stopów magnezu z tej grupy stopów.

Ze względu na skład chemiczny można wyróżnić kilka podstawowych grup odlewniczych stopów Mg, opartych na głównych pierwiastkach stopowych takich jak Al, Mn, Zn, Zr i RE.

Są one podzielone na następujące podgrupy:

- stopy Mg-Al oraz Mg-Al-Zn,
- stopy Mg-Al-Mn,
- stopy Mg-Al-Si,
- stopy Mg-Zn-Cu, Mg-Zn-Zr, Mg-Zn-RE-Zr,
- stopy Mg-Ag-RE, Mg-Y-RE, Mg-Th, Mg-Sc,
- stopy Mg-Li.

Stopy z grupy Mg-Al oraz Mg-Al-Zn zawierają zwykle ok. 6-7 do 10% Al. Stopy Mg-Al-Zn dzielimy na: stopy z niewielkimi dodatkami Zn i Mn oraz stopy o mniejszym stężeniu Al, ale za to większym – Zn i Mn. Grupa stopów Mg, których głównym dodatkiem jest Al, charakteryzuje się niską ceną oraz dobrą wytrzymałością, plastycznością i odpornością na korozję atmosferyczną. Temperatura stosowania stopów Mg-Al i Mg-Al-Zn dochodzi do 95°C. Stopy Mg-Al-Mn zostały opracowane w celu polepszenia zdolności do odkształceń, przy zmniejszonym stężeniu Al oraz wprowadzeniu Mn w stężeniu ok. 0,5% (Zn<0,1%). Stopy Mg-Al-Si mogą być wykorzystywane w podwyższonej temperaturze pracy (powyżej 130°C), gdyż wykazują wysoką odporność na pełzanie i żarowytrzymałość. Stopy Mg-Zn poddaje się utwardzeniu wydzieleniowemu. Przy dużym stężeniu Zn (rzędu od 4 do kilkunastu procent) odlewy z grupy stopów Al-Zn cechuje „nienaprawialność” spawaniem z powodu dużego stężenia Zn. Stopy z dość licznej grupy Mg-Ag-RE, Mg-Y-RE, Mg-Th, Mg-Sc, miały być alternatywą dla stopów wymienionych wcześniej. Rezultatem decyzji o nie stosowaniu toru (Th) w stopach magnezu, spowodowanej jego radioaktywnością, były intensywne badania nad alternatywnymi stopami odpornymi na pełzanie. Dlatego powstały nowe stopy Mg-Sc zdolne do pracy w podwyższonej temperaturze (powyżej 300°C). Dodatki stopowe takie jak metale ziem rzadkich (RE) i skand (Sc) są stosunkowo drogie, co w pewnym stopniu ogranicza ich zastosowanie. Przemysł kosmiczny, lotniczy, a także jądrowy, wymagający od nich najlepszej charakterystyki pracy, jest w stanie

ponieść tego typu koszty. Dla szerszego zakresu zastosowań wymagania te nie są tak surowe, więc zbędne jest stosowanie drogich dodatków stopowych. Dodatek Ag w stopach z grupy Mg-Ag-RE istotnie poprawia reagowanie tych stopów na utwardzenie wydzieleniowe. Poprzez dodatek itru (Y) powstają stopy zawierające neodym (Nd) oraz itr (Y), odznaczające się wysoką wytrzymałością i odpornością na pęcznienie w wysokiej temperaturze. Ponadto stopy zawierające Y wykazują dobrą rozpuszczalność itru (Y) w Mg (do 12,5%) oraz zdolność stopów Mg-Y do utwardzania wydzieleniowego. Ze względu na dość duży koszt czystego itru i jego silne powinowactwo do tlenu zaczęto stosować mieszaninę metali ziem rzadkich: 75% itru (Y) z erbem (Er) i gadolinem (Gd) z powodzeniem zastępującą czysty itr. Eksperymentalne stopy magnezu mogą zawierać ponadto samar (Sm) oraz metale ciężkie ziem rzadkich. Stopy z ostatniej grupy Mg-Li są interesujące ze względu na małą gęstość litu. Gęstość stopów tej grupy, przy stężeniu (14-16)% Li osiąga (1,35-1,45) g/cm³. Powodem, dla którego stopy Mg-Li są interesującym materiałem konstrukcyjnym, jest ich mała gęstość przy zachowaniu wysokiej wytrzymałości. Stopy Mg-Li oprócz wysokiej sztywności i małej gęstości wykazują również dobrą podatność na obróbkę skrawaniem. Jedną z wad tych materiałów jest fakt, iż są one o wiele bardziej aktywne chemicznie niż pozostałe stopy Mg. Ponadto, ze wzrostem stężenia Al odporność korozyjna stopów Mg-Li maleje, mimo stosowania powłok ochronnych, co spowodowane jest reakcjami elektrochemicznymi [1, 8, 20]. Stopy magnezu odlewane ciśnieniowo są stosowane na przekładnie silników samochodowych, coraz powszechniej stanowią substytut aluminiowych odlewów ciśnieniowych, stosowanych np. na bloki silników spalinowych, obudowy przekładni biegów oraz na elementy karoserii [23].

Podstawowe stopy magnezu do obróbki plastycznej zawierają do 8% Al oraz dodatek Mn (do 2%), Zn (zwykle do 1,5%), Si (około 0,1%) i śladowe ilości Cu, Ni, Fe. Można wyróżnić trzy grupy stopów do kształtowania plastycznego [11]:

1) stopy z dodatkiem aluminium (Al.) oraz cynku (Zn) i manganu (Mn):

- Mg-Mn (M1, M2);
- Mg-Al-Zn (AZ21, AZ31, AZ 61 i AZ80);
- Mg-Zn - (Mn, Cu) (ZM21, ZC71);

2) stopy zawierające głównie pierwiastki Zn, RE, Y, Zr, Th:

- Mg-Zn-Zr (ZK30, ZK40 i ZK 60);
- Mg-Zn- RE (ZE10);
- Mg-Y-RE-Zr (WE43, WE54);
- Mg-Th (HK31, HM21, HZ11);

3) trzecią grupę, będącą w fazie intensywnych badań stanowią nowe ultralekkie stopy zawierające Li typu Mg-Li-Al (LA141).

Dwie podstawowe cechy stopów magnezu z grupy stopów przeznaczonych do obróbki plastycznej (ograniczające zastosowanie, jako materiału przerabianego plastycznie) są to: skłonność do bliźniakowania oraz budowa sieci krystalicznej

(heksagonalna zwarta). Głównie z tego względu dostępność tych stopów jest mniejsza niż stopów odlewniczych. Stopy magnezu przerabiane plastycznie są stosowane sporadycznie, co wynika również z trudności technologicznych przy przeróbce plastycznej i wysokich kosztów wytwarzania. Wśród stopów do obróbki plastycznej najważniejszą rolę odgrywają stopy z grupy Mg-Al-Zn. Stopy z tej grupy są wykorzystywane w lotnictwie w skali podobnej do odlewniczych stopów magnezu. Przykładowe stopy z grupy Mg-Al-Zn przeznaczone do obróbki plastycznej to AZ31, AZ61 oraz AZ80. Zastosowanie stopu AZ31 ogranicza się do części pracujących w temperaturze do ok. 95°C. Do zastosowań w wyższych temperaturach przeznaczone są stopy, które zawierają np. tor (Th). Najwyższą wytrzymałością wśród półwyrobów kształtowanych ze stopów magnezu przeznaczonych do obróbki plastycznej, odznaczają się odkuwki, lecz ze względu na zastosowanie najważniejsze są: kształtowalność ubytkowa, szczelność oraz brak odkształceń wytwarzanych elementów maszyn i urządzeń [11, 20].

Najnowszą grupą, często omawianą oddzielnie, są stopy magnezu wytwarzane przy pomocy technologii niekonwencjonalnych z tzw. szybkim krzepnięciem (krzepnięcie z dużymi prędkościami). Metoda szybkiego krzepnięcia (RS – *rapid solidification*) stosowana jest do modyfikacji mikrostruktury stopów. Metoda przeznaczona jest głównie do odlewniczych stopów magnezu, ale może być stosowana również, w pewnych przypadkach, do stopów przeznaczonych do obróbki plastycznej (rozprzestrzenianie z dużą prędkością frontu krzepnięcia). Skuteczność metody zależy od szybkości wydzielenia ciepła przemiany fazowej podczas zmiany stanu skupienia, co z kolei związane jest z kontrolą usuwania ciepła (tzw. „krótka ścieżka krzepnięcia”) lub bardzo szybkim przechłodzeniem. Metoda szybkiego krzepnięcia pozwala na uzyskanie drobnoziarnistej mikrostruktury oraz poprawę właściwości wytrzymałościowych, wzrost odporności na korozję i pełzanie. Niektóre stopy wytwarzane tą metodą wykazują właściwości nadplastyczne. Odlewane taśmy wytwarzane z materiałów poddanych szybkiemu krzepnięciu są następnie mechanicznie mielone na proszki, które kolejno umieszczone w specjalnym metalowym pojemniku są wyciskane w celu wytworzenia prętów [7, 20, 29].

2.4. Zastosowania stopów magnezu

Magnez w stanie czystym stosowany jest jako składnik, dodatek chemiczny oraz odtleniacz i modyfikator stopów metali. Stopy magnezu zawierają zwykle, co najmniej 90% magnezu. Produkowane są z metalu podstawowego lub rafinowanego poddanego recyklingowi [32]. Czysty magnez (99,8%) dostarczany jest w postaci wlewków i gąsek do dalszego przerabiania (głównie jako odlewy), proszków, drutów oraz taśm (walcowanych lub wyciskanych) [7, 20]. Na rys. 2.2 przedstawiono typowe zastosowania odlewniczych stopów magnezu (rys. 2a), oraz stopów przeznaczonych do przeróbki plastycznej (rys. 2b).

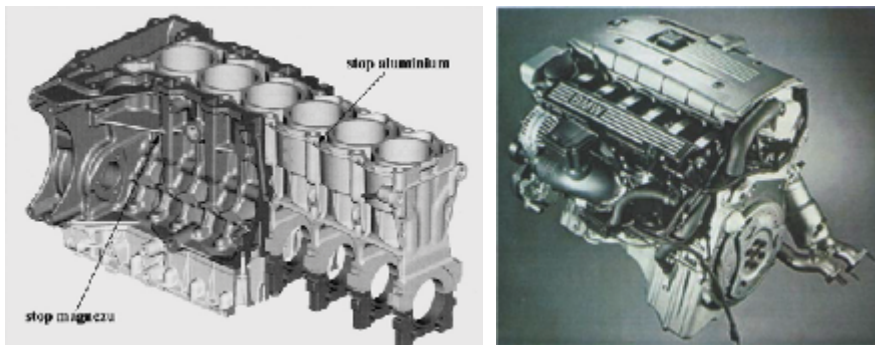


Rys. 2.2. Typowe elementy wykonywane ze stopów Mg na potrzeby przemysłu lotniczego [13, 27, 33-34, 36-40]

Stopy Mg są często stosowane w różnych gałęziach przemysłu, m.in. w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, elektronicznym, sportowym, medycznym. Również w takich obszarach jak: transport, kosmonautyka, aparatura automatyczna i robotyka, stopy Mg znajdują coraz szersze zastosowanie [2, 3, 13, 14, 23]. Stopy te mają zastosowanie także w nowoczesnych konstrukcjach lekkich, wytwarzanych m.in. na potrzeby przemysłu lotniczego. Mniejsza masa konstrukcji lotniczych czy motoryzacyjnych prowadzi do obniżenia zużycia paliwa (oszczędność w kosztach eksploatacji). Stopy magnezu posiadają niewielką gęstość ok. $\rho=1,8 \text{ g/cm}^3$ (w zależności od gatunku stopu), wysoką wytrzymałość właściwą oraz dość niskie koszty wytwarzania. Zainteresowanie stopami magnezu na elementy konstrukcyjne dla przemysłu lotniczego sięga okresu lat 40 XX wieku. Już podczas drugiej wojny światowej, gdy magnez i jego stopy stosowano głównie do celów wojskowych, światowa produkcja magnezu zwiększyła się dziewięciokrotnie [11, 21, 30, 31]. Doskonałymi przykładami (jako przedmioty codziennego użytku) mogą być np. laptopy, telefony komórkowe, drobny sprzęt AGD, maszyny biurowe, element wyposażenia wnętrza aut.

Powszechnie przyjętym jest dążenie do tego, aby maksymalnie zminimalizować czas potrzebny do wdrożenia nowych prototypów, koncepcji np. dla obudowy telefonów komórkowych wykonywanych z blachy. Zastosowanie znajdują tu

zintegrowane systemy wytwarzania [15]. Również obudowy laptopów mogą być produkowane, w procesie tłoczenia, zarówno ze stopów klasycznych takich jak stop. AZ31, jak i nowoczesnych stopów nowej generacji LZ91 (z dodatkiem litu Li) [28]. Zainteresowanie w zakresie zastosowania w aplikacjach motoryzacyjnych stopów magnezu wykazują takie firmy jak np. GM i BMW. Dla przykładu stopy z grupy Mg-Zr znajdują zastosowanie, jako elementy bloku silnika. Takie rozwiązania wymuszają dyrektywy odnośnie dopuszczalnej emisji spalin oraz oszczędności w gospodarce paliwami [4, 9, 12, 14]. W budowie silników motoryzacyjnych stopy te wykorzystuje się na korbowody silników samochodów sportowych, do wytwarzania kadłubów, także obudowy skrzyń biegów [12, 33]. Stopy magnezu znajdują również zastosowanie w przemyśle sportowym (np. ramy rowerów, wyposażenie narciarskie) oraz jako materiały ortopedyczne, biomateriały (stopy z grupy Mg-Ca), służące do produkcji implantów. Badania kliniczne dotyczące biokompatybilności (prawidłowego oddziaływania w żywym organizmie), stopów Mg-Ca, przyniosły bardzo atrakcyjne rezultaty.



Rys. 2.3. Kadłub silnika BMW 3.0 wykonany ze stopu Al oraz stopu Mg [12, 14]

Stopy te nie generują żadnych toksycznych, rakotwórczych, czy mutagennych produktów, więc mogą być akceptowane także z fizjologicznego punktu widzenia [6, 10, 26]. Na rys. 2.3 przedstawiono przykładowe rozwiązanie bloku silnika samochodu osobowego.

2.5. Typowy asortyment handlowy magnezu i jego stopów

Czysty magnez dostępny jest głównie w postaci gąsek lub wlewków magnezowych, które następnie poddaje się procesowi wytwarzania określonych stopów, przeznaczonych do wykonywania odlewów (odlewnicze stopy magnezu) lub np. odkuwek (stopy obrabiane plastycznie) [20]. Na rynku krajowym dostępny jest, w zależności od sposobu wytwarzania, następujący asortyment handlowy stopów magnezu [7, 20, 41]:

- stopy odlewnicze wykonywane są jako odlewy:
 - odlewy ciśnieniowe D (wykonywane w technologii z gorącą komorą lub zimną komorą),
 - odlewy w formach piaskowych S,
 - odlewy w kokilach K (stan utwardzony wydzieleniowo T4, T5 i T6),
 - odlewy precyzyjne L,
 - odlewy wykonywane ze stanu stałociekłego (tiksoodlewanie, reoodlewanie, tiksoformowanie),
 - odlewy ciśnieniowe z doprasowaniem.
- stopy do obróbki plastycznej wykonywane jako:
 - elementy walcowane (w postaci prętów, płyt, blach i taśm),
 - elementy wyciskane (pręty pełne lub wydrążone),
 - elementy kute (odkuwki).
- stopy wytwarzane szybkim krzepnięciem:
 - taśmy.

Należy także podkreślić, że możliwe są zamówienia specjalne, zarówno dla stopów odlewniczych jak i do stopów do obróbki plastycznej. Dostawcy i producenci wykazują odpowiednią elastyczność w pertraktacjach z odbiorcami.

Literatura

1. Adamiec J.: *Spawalność odlewniczych stopów magnezu*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
2. Akyuz B.: *Machinability of magnesium and its alloys*, TOJSAT: The Online Journal of Science and Technology – July 2011, Volume 1, Issue 3, s.31-38.
3. Barton G., Deinzer G., Baumgart H.: *Wybrane zagadnienia wytwarzania i eksploatacji elementów maszyn ze stopów magnezu*, Journal of Kones Internal Combustion Engines, 11/2004, s.29-34.
4. Bławert C., Hort N., Kainer K.U.: *Automotive Applications of Mg and Its Alloys*, Transactions of the Indian Institute of Metals, Vol. 57, No. 4, August 2004, s.397-408.
5. Chodorowski J., Ciszewski A., Radomski T.: *Materiałoznawstwo lotnicze*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1980.
6. Denkena B, Lucas A., Thorey F., Waizy H., Angrisani N., Meyer-Lindenberg A.: *Biocompatible Magnesium Alloys as Degradable Implant Materials – Machining Induced Surface and Subsurface Properties and Implant Performance*, Special Issues on Magnesium Alloys, Edited by Waldemar A. Monteiro, Published 12.09.2011r., s.109-128.
7. Dobrzański L.A.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Gliwice 2002.

8. Dobrzański L.A., Tański T., Dobrzańska-Danikiewicz A.D., Król M., Malara Sz., Domagała-Dubiel J.: *Struktura i własności stopów Mg-Al-Zn*, *Scientific International Journal of the World Academy of Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 5 (11) 2012.
9. Fajkiel A., Białobrzeski A., Dudek P., Reguła T.: *Nowoczesne stopy oraz metody odlewania magnezu w zastosowaniach motoryzacyjnych*, *Przegląd Mechaniczny*, 2/2009, s. 30-35.
10. Guo Y.B., Salahshoor M.: *Process mechanics and surface integrity by high-speed dry milling of biodegradable magnesium-calcium implant alloys*, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 59 (2010), s.151-154.
11. Hadasik E., Kuc D., Szuła A.: *Kształtowanie plastyczne stopu magnezu AZ31*, *Rudy i Metale Nieżelazne*, 6/2010, s.313-317.
12. Idzior M.: *Kierunki zmian materiałowych w motoryzacji w świetle wymogów ekologii*, *MOTROL*, 9/2007, s.72-87.
13. Jądrzyk P.: *Obróbka stopów magnezu narzędziami firmy MAPAL*, *Mechanik*, 3/2008, s.186-187.
14. Kulekci M.K.: *Magnesium and its alloys applications in automotive industry*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39 (2008), s.851-865.
15. Lin B.T., Kuo Ch.: *Application of an integrated RE/RP/CAD/CAE/CAM system for magnesium alloy shell of mobile phone*, 6/2009, s.2818-2830.
16. Łunarska S., Opiekun Z., Sieniawski J.: *Materiałoznawstwo lotnicze*, praca zbiorowa pod red. A. Bylicy, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1980.
17. Miernik M.: *Skrawalność metali. Metody określania i prognozowania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
18. Oczóś K.E.: *Efektywne skrawanie stopów magnezu*, *Mechanik*, 7/2000, s. 467-474.
19. Oczóś K.E.: *Rozszerzenie granic stosowalności stopów magnezu*, *Mechanik*, 5-6/2009, s. 386-400.
20. Oczóś K.E., Kawalec A.: *Kształtowanie metali lekkich*, PWN, Warszawa 2012.
21. Orman M., Orman Z.: *Technologia magnezu i jego stopów*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1965.
22. Ostrovsky I., Henn Y.: *Present State And Future Of Magnesium Application In Aerospace Industry*, International Conference NEW CHALLENGES IN AERONAUTICS, ASTEC'07, August 19-22, 2007, Moscow.
23. Piątkowski J., Binczyk F.: *Właściwości i zastosowanie odlewniczych stopów Mg-Al.*, *Archiwum Odlewnictwa*, PAN Katowice, 4/2002, s.426-433.
24. Reguła T., Bronicki M., Lech-Grega M., Czekaj E.: *Ocena możliwości kształtowania właściwości mechanicznych odlewniczego stopu magnezu AZ91 przez zastosowanie odpowiedniej obróbki cieplnej*, *Prace Instytutu Odlewnictwa* 1/2008, Tom XLVIII.

25. Reguła T., Fajkiel A., Dudek P., Saja K.: *Ocena skuteczności specjalnej obróbki cieplnej stopu magnezu AZ91 zapobiegającej rozrostowi ziarna*, Prace Instytutu Odlewnictwa 4/2008, Tom XLVIII.
26. Salahshoor M., Guo Y.B.: *Cutting mechanics in high speed dry machining of biomedical magnesium-calcium alloy using internal state variable plasticity model*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 51 (2011), s.579-590.
27. Sprus M.: *Narzędzia do obróbki materiałów konstrukcyjnych o zredukowanej masie*, Cz. I, Mechanik, 11/2007, s.926-929.
28. Tsai H.K., Liao Ch.Ch., Chen F.K.: *Die design for stamping a notebook case with magnesium alloy sheets*, Journal of Materials Processing Technology, 201/2008, s.247-251.
29. Yang Z., Li J.P., Zhang J.X., Lorimer G.W., Robson J.: *Review on research and development of magnesium alloys*, Acta Metallurgica Sinica (English Letters), Vol.21, No.5, 2008, s.313-328.
30. PN-EN 1753:2001: *Magnez i stopy magnezu – Gąski i odlewy ze stopów magnezu*.
31. „Stanchem” sp.j., Świadcstwo kontroli jakości: Stop magnezu AZ91HP, z dnia 14.12.2009r.
32. <http://www.ntp.com.pl/>, *Magnez – materiał o rewelacyjnych właściwościach*, z dnia 3.03.2010r.
33. <http://www.polmag.pl/>, z dnia 9.04.2010r.
34. <http://www.keronite.com/>, z dnia 10.12.2012r.
35. Maciejny A.: *Metale i stopy metaliczne oraz ich wpływ na rozwój inżynierii materiałowej w Polsce*, http://fundacjarozwojunauki.pl/res/Tom2/2_Maciejny.pdf, z dnia 8.11.2010r.
36. Strazzi E., Ferrari Ch.: *Low energy consumption and environmental friend process formagnesium anodising*, <http://www.italfinish.com/public/images/lowenergy1.pdf>, z dnia 9.04.2010r.
37. <http://www.wskrz.com/>, z dnia 22.04.2012r.
38. <http://www.dolinalotnicza.pl/> z dnia 3.11.2012r.

3. Skrawalność stopów aluminium i magnezu

Większość elementów wytwarzanych ze stopów magnezu na potrzeby m.in. przemysłu lotniczego, poddawana jest głównie obróbce frezowaniem, gdyż ze względu na charakter półwyrobów, przeznaczenie oraz zastosowanie, największe znaczenie, z punktu widzenia obróbki skrawaniem, ma właśnie ten rodzaj obróbki. Ze względu na konstrukcję, zarówno półfabrykaty odlewane jak i wytwarzane poprzez przeróbkę plastyczną, są najczęściej obrabiane frezowaniem.

Głównym celem frezowania jest usunięcie nadmiaru w jak najkrótszym czasie. Istotnym problemem jest więc zagadnienie wydajnej i efektywnej obróbki frezowaniem. Wpływ na efektywność oraz wydajność obróbki mają następujące ważniejsze czynniki [66]:

- geometria części roboczej narzędzia,
- sposób obróbki, frezowanie wgłębne bądź czołowe (możliwie maksymalne skrócenie czasów maszynowych),
- cechy geometryczne przedmiotu,
- sztywność układu OUPN,
- parametry maszyny technologicznej.

3.1. Pojęcie skrawalności

Skrawalność jest to podatność materiału na obróbkę skrawaniem [20, 21, 29, 31, 55, 69, 79]. Skrawalność materiałów konstrukcyjnych oceniana jest na podstawie wskaźników skrawalności. Skrawalność, jest to więc zespół cech materiału, uzależniony od czynników środowiska obróbkowego, czyli m.in. kinematyki procesu, sposobu jego realizacji, składu stopu, stanu struktury, warunków skrawania, geometrii narzędzia, materiału ostrza narzędzia, stanu technicznego, właściwości dynamicznych (sztywności) obrabiarki [20, 21, 55, 79]

3.2. Wskaźniki skrawalności

Wskaźniki skrawalności mogą być definiowane na różne sposoby. Wg [87] wskaźniki te dzielimy na użytkowe oraz fizyczne. *Użytkowymi* wskaźnikami skrawalności są: trwałość ostrza narzędzia, chropowatość powierzchni obrobio-

nej, siły występujące w procesie skrawania, rodzaj i kształt wiórów. Do *fizycznych* wskaźników skrawalności zalicza się m.in.: temperaturę skrawania, współczynnik spęczenia wióra, zdolność materiału do tłumienia drgań, naprężenia własne, utwardzenie warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu.

Inaczej wskaźniki skrawalności są zdefiniowane wg [21], gdzie do oceny materiałów stosuje się *względne* i *bezwzględne* wskaźniki skrawalności. W pierwszym przypadku ocena skrawalności danego materiału dokonywana jest względem materiału wzorcowego, w drugim przypadku poszczególne gatunki materiałów grupuje się według zbliżonych cech skrawalności, tworząc w ten sposób od kilku do kilkunastu grup. Wśród stosowanych względnych wskaźników skrawalności wyróżnia się grupę wskaźników *podstawowych* (okresowa prędkość skrawania lub jej pochodne tj. okres trwałości ostrza, intensywność zużycia ostrza i chropowatość powierzchni obrobionej) oraz *pomocniczych* (składowe siły skrawania, moc skrawania, właściwości mechaniczne i cieplne materiału, skorelowane z okresem trwałości ostrza, oraz rodzaj i kształt wiórów).

Wskaźniki skrawalności możemy definiować, jako:

- fizyczne (m.in.: temperatura skrawania, współczynnik spęczenia wióra, zdolność materiału do tłumienia drgań, naprężenia własne, utwardzenie warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego) oraz użytkowe wskaźniki skrawalności (m.in. trwałość ostrza narzędzia, chropowatość powierzchni obrobionej, siły skrawania, rodzaj i kształt wiórów) [78, 79, 86];
- względne (podstawowe tj. okresowa prędkość skrawania, okres trwałości ostrza, intensywność zużycia ostrza, chropowatość powierzchni obrobionej oraz pomocnicze tj. składowe siły skrawania, moc skrawania, właściwości mechaniczne, właściwości cieplne materiału skorelowane z okresem trwałości ostrza, rodzaj i kształt wiórów) i bezwzględne wskaźniki skrawalności [21].

3.3. Skrawalność stopów aluminium

Stopy aluminium (poza niektórymi gatunkami) są dobrze skrawalne, jednak ich skrawalność jest różna od innych metali co wymaga stosowania odmiennych warunków obróbki. Wynika to z właściwości stopów aluminium, takich jak [18, 60]:

- 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) – duża elastyczność jest przyczyną odkształceń przedmiotu w trakcie intensywnie przeprowadzanej obróbki, jak również odkształceń wynikających z zamocowania przedmiotu;
- duża przewodność cieplna – przyczynia się do szybszego odprowadzenia ciepła z ostrza narzędzia i obniżenia jego temperatury co zwiększa jego trwałość.

Ze względu na dużą ilość gatunków stopów aluminium (patrz rozdział 2), w celu ułatwienia doboru warunków ich obróbki, podzielono je na grupy o zbliżonej skrawalności. Jednym z kryteriów podziału jest zawartość krzemu w stopie [18, 60, 64]:

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

Podział ten nie jest zbyt doskonały, gdyż nie uwzględnia rodzaju przeprowadzonej obróbki cieplnej oraz przeznaczenia stopów (do przeróbki plastycznej i odlewnicze), co ma decydujący wpływ na ich strukturę oraz skrawalność. Uwzględniając powyższe czynniki, można dokonać następującej klasyfikacji stopów aluminium [51, 55]:

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

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

Zawartość krzemu w ilości 10-12% stanowi istotną granicę wskazującą na skrawalność stopów aluminium. Powyżej tej zawartości Si, czyli dla stopów grupy III, silne oddziaływanie ściernie pierwotnych wydzieleni krzemu zwiększa zużycie ostrzy narzędzi. Dlatego stopy te najczęściej obrabiane są narzędziami z powlekanymi węglików spiekanych lub z polikrystalicznego diamentu (PKD). Głównym celem stosowania cieczy obróbkowych, przy obróbce materiałów tej grupy, jest spłukanie dużej ilości drobnego „ścieru” krzemowego, powstającego podczas skrawania [51, 55].

Stopy aluminium grupy I, szczególnie dla małych prędkości skrawania, wykazują skłonność do „mazania się” oraz tworzenia narostu, co wpływa na pogorszenie jakości obrabianej powierzchni. Wynika to z niewielkiej twardości, dużej ciągliwości i adhezji do materiału narzędziowego oraz podatności do umacniania zgniotem tych materiałów. Podczas ich obróbki należy stosować narzędzia o ostrej geometrii oraz duże prędkości skrawania. Ciecze obróbkowe powinny zapewniać intensywne smarowanie w celu zmniejszenia adhezji oraz ułatwienia formowania i odprowadzania wiórów [29, 51, 55].

Najlepszą skrawalnością charakteryzują się obrabiane cieplnie stopy aluminium grupy II. Są lepiej skrawalne od stopów w stanie naturalnej twardości (umocnionych zgniotem), gdyż mają mniejszą tendencję do „mazania się”, przy nieco zwiększonym zużyciu ostrza. Stopy odlewnicze o zawartości Si $< 12\%$ zaliczane do grupy II, ze względu na ich strukturę ułatwiającą łamanie wiórów, są lepiej skrawalne niż

odpowiednie stopy do przeróbki plastycznej o takim samym składzie chemicznym i stanie obróbki [29, 51, 55].

Wytrzymałość obrabianych cieplnie, przez utwardzanie wydzieleniowe, stopów do przeróbki plastycznej spada ze wzrostem temperatury. Warunki obróbki należy więc tak dobrać aby temperatura skrawania nie zbliżyła się do temperatury rekrytalizacji [55].

Do podstawowych problemów technologicznych występujących w procesie skrawania stopów aluminium należy zaliczyć [18, 51, 55, 60]:

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

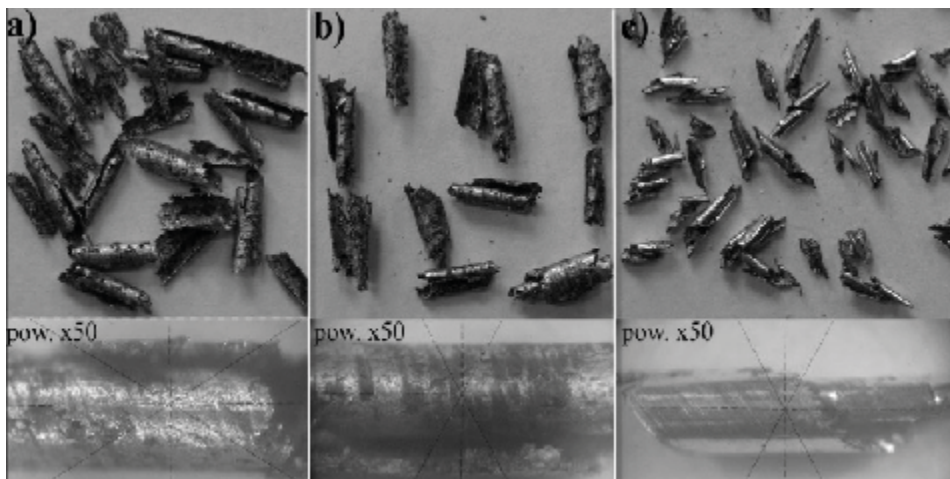
Dla konstrukcji lotniczych, w których elementy wykonane ze stopów aluminium stanowią nawet 80% a ubytek masy podczas obróbki sięga 97%, istotne znaczenie ma zwiększanie wydajności obróbki, które uzyskuje się stosując wysokowydajne techniki obróbki takie jak HSM czy HPC. Techniki te ze względu na znaczne zwiększenie wydajności, a więc skrócenie cyklu obróbkowego, są szczególnie przydatne w obróbce stopów aluminium, dla których stają się standardem [13, 55].

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

3.3.1. Kształtowanie wiórów

Kształtowanie i odprowadzanie wiórów jest trudnym zagadnieniem przy toczeniu i wierceniu stopów aluminium, gdzie powstające długie, splątane wióry wstęgowe „oplątują się” wokół narzędzia lub przedmiotu obrabianego, co może doprowadzić do ich uszkodzenia. Proces tworzenia wiórów oraz ich kształt jest szczególnie istotny w obróbce na zautomatyzowanych obrabiarkach CNC, gdzie wydajność oraz dynamika procesu są bardzo duże, a operator ma ograniczone możliwości ingerencji w strefę obróbki oraz bardzo krótki czas na reakcję. W przypadku frezowania, ze względu na przerywany charakter tej obróbki, wióry mają bardziej korzystny kształt. Jednak ze względu na jego wysoką wydajność, szczególnie w aspekcie stosowania metod obróbki takich jak HSC i HPC, również tutaj kształt, tworzenie oraz odprowadzanie wiórów ze strefy obróbki jest bardzo istotne. Aby ułatwić formowanie wióra oraz jego łamanie należy stosować odpowiednią geometrię narzędzi, tzn. duże kąty natarcia oraz zwijacze, łamacze czy rozdrabniacze wiórów. Na rys.3.1 przedstawiono przykładowe kształty wiórów powstających

w trakcie obróbki odlewniczego stopu Al-Si różnymi narzędziami. Widoczna jest wyraźna różnica między kształtem wiórów z rys. 3.1a,b oraz wiórami z rys.3.1c, które powstały w trakcie obróbki narzędziem dedykowanym do obróbki stopów aluminium z polerowaną powierzchnią natarcia. Mają one bardziej zwartą budowę (są mocniej „zwinięte”), a przez to zmniejszone wymiary co ułatwia ich usuwanie ze strefy obróbki oraz z przestrzeni obróbkowej obrabiarki. Przykład obrazuje jak bardzo istotny wpływ na kształt wióra ma nie tylko dobór właściwej geometrii narzędzia ale również odpowiednie przygotowanie jego powierzchni. Stosowanie narzędzi powlekanych lub z polerowaną powierzchnią natarcia, o dużych kątach natarcia, w przedziale 12–25° [11, 35], ogranicza przywieranie materiału obrabianego do ostrza ułatwiając kształtowanie i odprowadzanie wiórów. Jest to szczególnie ważne dla materiałów o małej zawartości składników stopowych, które mają tendencję do powstawania przywarć oraz związanego z tym zjawiska narostu [11, 53]. W celu ułatwienia usuwania dużej ilości wiórów należy stosować narzędzia z dużą podziałką tzn. o niewielkiej ilości ostrzy, najczęściej 2 lub 3 ostrza, co umożliwi zwiększenie przestrzeni rowków wiórowych [11, 35].



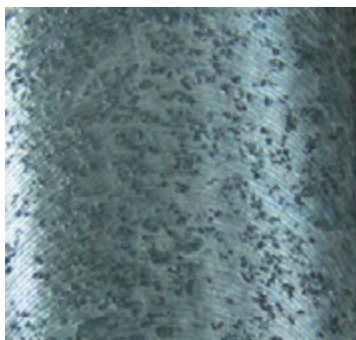
Rys. 3.1. *Kształt wiórów przy obróbce różnymi narzędziami; a) frez monolityczny – stal szybkoobrotowa, b) frez składany – płytka węglkowa z powłoką TiN, c) frez monolityczny – węgiel bez powłoki [60]*

Na poprawę procesu kształtowania wiórów oraz ich odprowadzanie ze strefy obróbki wpływa zastosowanie właściwych cieczy obróbkowych. Ciecze obróbkowe ułatwiają odprowadzenie ciepła oraz zmniejszają lub nawet eliminują zjawisko tworzenia się narostu. Szczególnie dobre efekty przy obróbce aluminium i jego stopów uzyskuje się przez zastosowanie chłodzenia wewnętrznego przez narzędzie. Wymaga to zastosowania narzędzia i obrabiarki o odpowiedniej konstrukcji

i możliwościach technologicznych. Zastosowanie dużego ciśnienia cieczy roboczej (powyżej 5–7 MPa) oraz odpowiednio ukształtowanych dysz doprowadzających umożliwia łamanie wiórów co zapewnia ich korzystniejszą postać.

3.3.2. Jakość powierzchni

Można zaobserwować, że dla stopów aluminium do przeróbki plastycznej, jakość powierzchni obrabianej ulega poprawie wraz ze wzrostem ich wytrzymałości i twardości, co wiąże się ze składem chemicznym oraz rodzajem przeprowadzonej obróbki cieplnej. 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 wrywane (rys. 3.2), co powoduje pogorszenie jakości powierzchni [55].



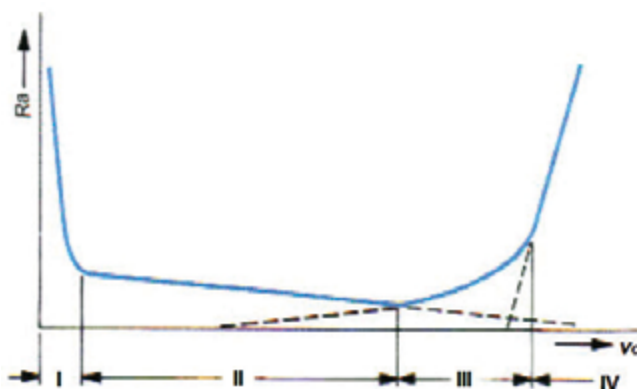
Rys. 3.2. Widok powierzchni obrabianej przedmiotu wykonanego z odlewniczego stopu Al-Si.

Parametrami technologicznymi najbardziej wpływającymi na jakość powierzchni obrabianej jest 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 [16, 19, 59]. Jednak przy małych prędkościach skrawania typowe dla stopów aluminium jest zwiększenie skłonności do tworzenia się narostu. Okresowe przywieranie i odrywanie cząstek stopu aluminium, które osadzają się na powierzchni przyłożenia ostrza (rys.3.4), wpływa na pogorszenie jakości powierzchni. Ze względu na zmiany jakości powierzchni, wraz ze wzrostem prędkości skrawania można wyróżnić cztery odrębne obszary (rys.3.3) [30, 55]:

- zakres I – małe prędkości skrawania v_c , sprzyjają tworzeniu się, przy krawędzi skrawającej ostrza, 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 ograniczenia tego zjawiska konieczne jest usztywnienie konstrukcji układu obróbkowego;
- zakres IV – niska jakość powierzchni wywołana jest powstawaniem tzw. pozornych wiórów (*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 [55].

Na gładkość powierzchni podobnie jak i na proces kształtowania wiórów oraz siły skrawania wpływają właściwości zastosowanych narzędzi skrawających. Duży kąt natarcia i gładka powierzchnia natarcia sprzyjają łatwemu spływowi wiórów oraz ograniczają adhezyjne przywieranie do powierzchni ostrza, co ma decydujący wpływ na jakość obrabianych powierzchni [7, 19].



Rys. 3.3. Zależność parametru Ra od prędkości skrawania v_c podczas obróbki stopów Al [30, 55]

Istotny wpływ ze względu na jakość 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 [19, 68].

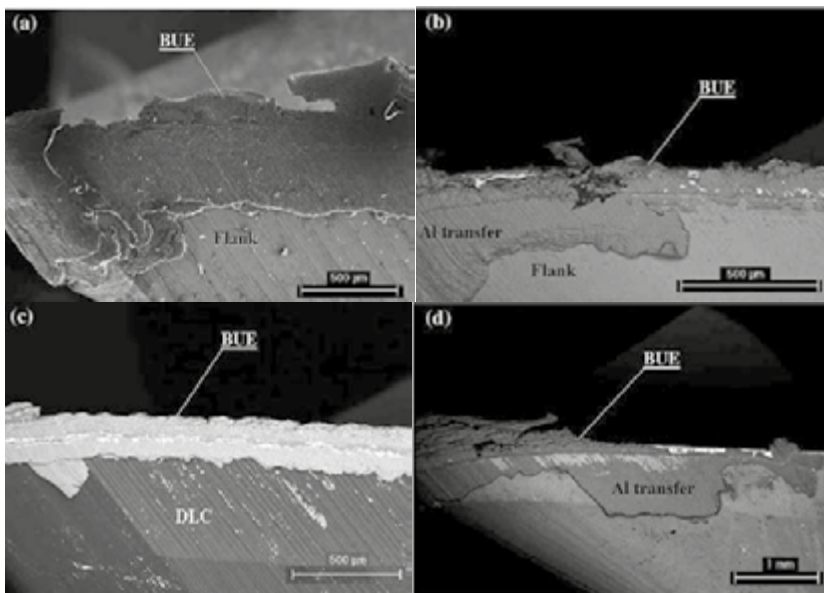
3.3.3. Zużycie narzędzi

Zużycie narzędzi dla stopów aluminium o małej zawartości składników stopowych (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 [12, 26, 63]. Na intensywność zjawisk adhezyjnych na ostrzu narzędzia, duży wpływ ma zastosowane pokrycie ostrza (lub jego brak) [26, 40]. Na rys.3.4 przedstawiono wpływ pokrycia narzędzia na wielkość narostu.

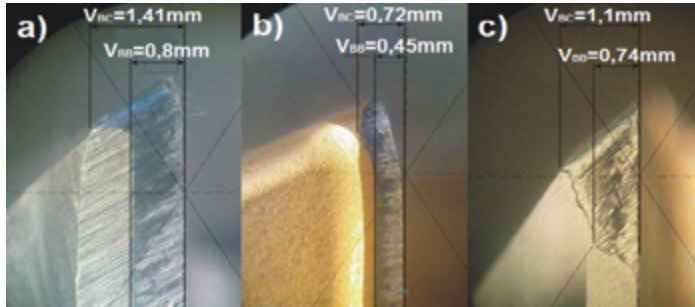
Obok zużycia adhezyjnego zawsze występuje zużycie ścierny, w przypadku obróbki stopów aluminium jest to głównie zużycie powierzchni przyłożenia. Zwiększa się ono wraz ze wzrostem stężenia składników stopowych i zanieczyszczeń [18, 55]. Trwałość ostrza ma szczególnie znaczenie przy obróbce nadeutektycznych odlewniczych stopów aluminium o zawartości $Si > 12\%$ oraz materiałów kompozytowych [15]. Wynika to z silnych właściwości ściernych:

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



Rys. 3.4. Powstawanie narostu na krawędzi skrawającej; a) ostrze bez powłoki ochronnej, b) powłoka $TiAlCrYN$, c) powłoka diamentowe DLC , d) powłoka $TiAlN/VN$ [26]

W celu zwiększenia trwałości ostrza przy obróbce tych materiałów należy stosować odpowiednie pokrycia lub narzędzia z ostrzami z PKD. Na rys. 3.5 przedstawiono fotografie obrazujące wartość zużycia powierzchni przyłożenia frezów wykonanych z różnych materiałów narzędziowych, po obróbce nadeutektycznego siluminu $AlSi21CuNi$ (AK20).

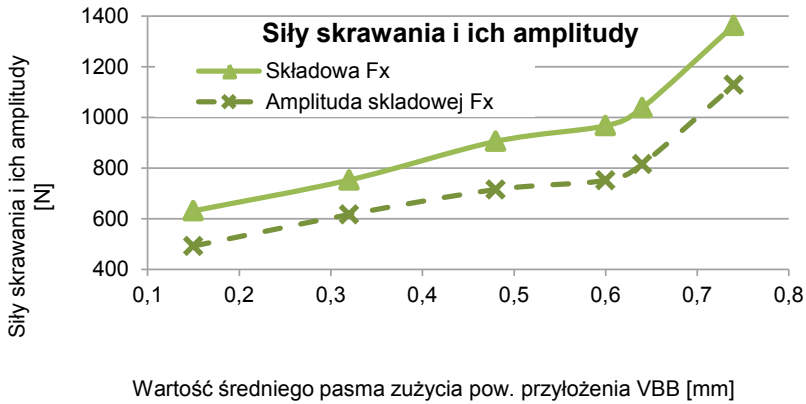


Rys. 3.5. Zużycie powierzchni przyłożenia przy obróbce nadeutektycznego stopu AC-AlSi-21CuNi; a) frez monolityczny – stal szybko tnąca ($v_c=75\text{m/min}$), b) frez składany – płytki węglkowa z powłoką TiN ($v_c=300\text{m/min}$), c) frez monolityczny – węglk bez powłoki ($v_c=300\text{m/min}$; droga frezowania ok. 3,5m)

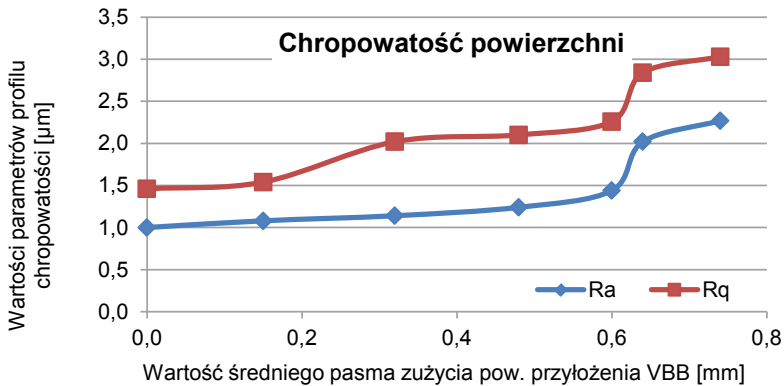
Parametry obróbki, a w szczególności prędkość skrawania, były dobrane odpowiednio do zastosowanego materiału narzędziowego, tzn. dla stali szybko tnącej – $v_c=75\text{m/min}$, a dla płytek wielostrzowych z powłoką TiN oraz narzędzia węglkowego – $v_c=300\text{m/min}$. Zastosowany frez węglkowy dedykowany do obróbki stopów Al bez powłoki ochronnej (rys.3.5c), przy czterokrotnie większej prędkości skrawania, wykazuje podobne wartości zużycia jak narzędzie wykonane ze stali szybko tnącej (rys. 3.5a). Natomiast wartość zużycia wkładek wielostrzowych z pokryciem TiN frezu składanego (rys. 3.5b), dla takich samych parametrów obróbki jak w przypadku narzędzia węglkowego, jest o ok. połowę mniejsza. Potwierdza to konieczność stosowania, w przypadku obróbki nadeutektycznych stopów Al-Si, dużo twardszych i bardziej odpornych na ścieranie materiałów narzędziowych niż w przypadku obróbki innych stopów Al.

Szczególnie dobre efekty daje stosowanie powłok diamentowych na podłożu węglkowym, które charakteryzują się twardą, gładką, odporną na ścieranie, monokrystaliczną strukturą. Oprócz zwiększonej trwałości, struktura taka zapobiega tworzeniu narostów i ułatwia spływanie wiórów. Podobne efekty (rys.3.5c) można zaobserwować dla powłoki DLC (*diamond-like carbon*) [7, 26, 48, 55, 56, 61].

a)



b)



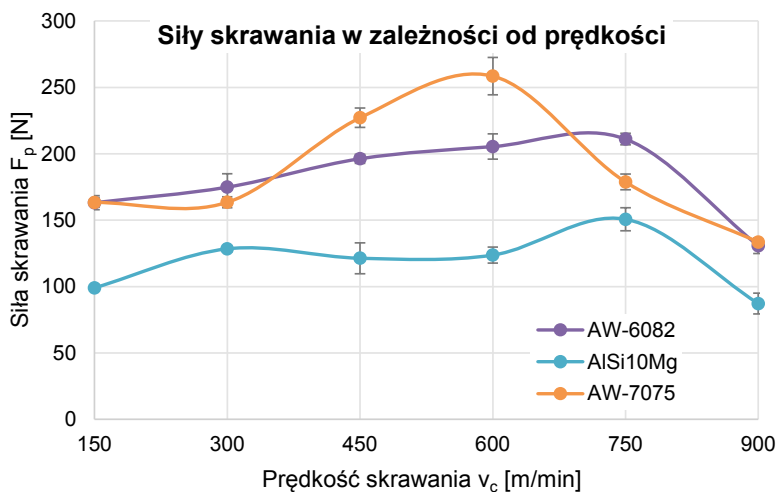
Rys. 3.6. Zmiany: a) składowej F_x siły skrawania oraz jej amplitudy, b) chropowatości powierzchni, w zależności od wartości zużycia przy obróbce nadeutektycznego stopu AC-AlSi21CuNi, frezem węglkowym niepowlekanym

Do niekorzystnych efektów zużycia narzędzi należy zaliczyć pogorszenie jakości powierzchni (rys.3.6b) oraz zwiększenie sił skrawania oraz ich amplitudy (rys.3.6a) co wpływa na obniżenie stabilności procesu skrawania.

3.3.4. Siły skrawania

Głównymi czynnikami wpływającymi na wartość siły skrawania są właściwości materiału obrabianego (rys. 3.7), parametry warstwy skrawanej, warunki chłodzenia i smarowania oraz konstrukcja i stan zużycia narzędzia (rys. 3.6a) [55, 65]. Na wartości sił skrawania wpływają również zastosowane parametry obróbki. Na rys.

3.7 przedstawiono zależność składowej F_p siły skrawania od prędkości skrawania dla trzech różnych stopów aluminium. Dla każdego z tych stopów widoczne jest charakterystyczne maksimum siły skrawania, przy pewnej prędkości skrawania, którą określa się jako „graniczną prędkość skrawania” między obróbką konwencjonalną i HSC [2, 3].

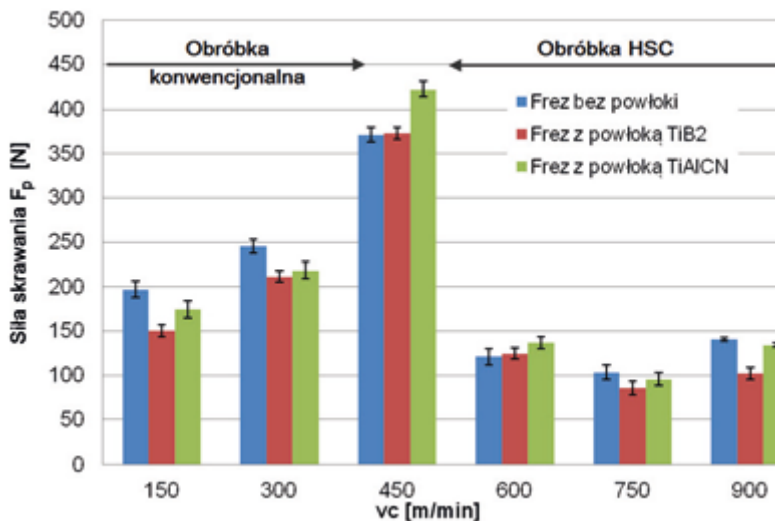


Rys. 3.7. Zmiany sił skrawania w zależności od prędkości skrawania v_c przy obróbce różnych stopów aluminium ($f_z=0,07\text{mm/ostre}$, $a_p=12\text{mm}$, $a_e=0,85\text{mm}$)

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 najbardziej na siłę oddziałuje kąt natarcia, którego zwiększanie powoduje mniejsze ścisnienie wióra, co obniża siłę skrawania. Należy jednak pamiętać, że jego zwiększenie powoduje zmniejszenie kąta ostrza, a w konsekwencji osłabienie narzędzia [55]. Duże znaczenie ma właściwe przygotowanie powierzchni narzędzia oraz zużycie krawędzi skrawającej. Stosowanie polerowanych powierzchni natarcia oraz odpowiednio dobranych powłok ochronnych zwiększa trwałość narzędzia i ułatwia sphywanie wiórów, co wpływa na zmniejszenie sił skrawania [19, 68].

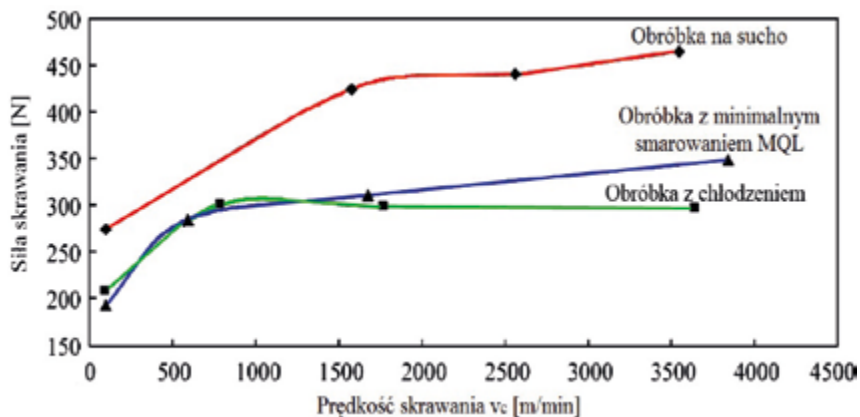
Jednak stosowanie powłok o dużej grubości wiąże się ze zwiększeniem promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej, co wpływa na wzrost sił skrawania [5, 11, 53]. Dobre efekty, w postaci obniżenia sił skrawania i zwiększenia trwałości narzędzia, daje zastosowanie ultracienkich powłok o grubości nie przekraczającej kilku mikrometrów, które praktycznie nie zmieniają promienia zaokrąglenia kra-

wędzi skrawającej [9, 58]. Na rys. 3.8 przedstawiono wpływ rodzaju zastosowanej powłoki, lub jej braku, na wartość składowej F_p siły skrawania w zależności od prędkości skrawania, przy obróbce stopu AW- $AlSiMgMn$, który zgodnie z przyjętą klasyfikacją możemy zaliczyć do stopów grupy I. Zastosowanie powłoki TiB_2 o grubości ok. $1\mu m$, praktycznie w całym zakresie przebadanych prędkości skrawania, powoduje obniżenie sił skrawania w stosunku do narzędzia bez powłoki. W przypadku nieco grubszej powłoki $TiAlCN$ podobny efekt jest zauważalny dla niższych prędkości skrawania odpowiadających obróbce konwencjonalnej. Dla prędkości skrawania z zakresu HSC, tzn. powyżej 450 m/min dla analizowanego przypadku, wartość sił skrawania jest wyższa lub porównywalna z uzyskanymi dla obróbki narzędziem bez powłoki.



Rys. 3.8. Siła skrawania przy obróbce stopu $AlSiMgMn$ narzędziami bez powłoki oraz z dwiema różnymi powłokami ochronnymi, w zależności od prędkości v_c (grubość powłok: TiB_2 – ok. $1\mu m$; $TiAlCN$ – ok. $2\mu m$; $f_z=0,08\text{mm/ostre}$, $a_p=12\text{mm}$, $a_e=1\text{mm}$)

Ciecze chłodząco-smarujące wpływają w dwojaki sposób na wartość siły skrawania. Z jednej strony obniżają temperaturę w miejscu powstawania wióra, co wymaga zastosowania większych sił w celu uplastycznienia materiału w obszarze ścinania, z drugiej, smarowanie obniża skłonność aluminium do przywierania do ostrza narzędzia oraz ułatwia odprowadzanie wiórów i tym samym wpływa na obniżenie sił skrawania. Wpływ tego drugiego zjawiska jest przeważający, dlatego zaleca się stosowanie intensywnego chłodzenia i smarowania strefy obróbki [19, 33, 68]. Na wykresie z rys. 3.9 widoczne jest wyraźne obniżenie wartości siły skrawania przy obróbce z chłodzeniem i minimalnym smarowaniem MQL w stosunku do obróbki na sucho.



Rys. 3.9. Siła skrawania w zależności od prędkości v_c , przy obróbce stopu AC-AlSi7Mg z różnymi rodzajami chłodzenia i smarowania strefy skrawania ($a_p=2\text{mm}$, $a_e=35\text{mm}$, $f_z=0,8\text{ mm/ostrze}$) [33]

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 mm^2 przekroju poprzecznego warstwy skrawanej danego materiału. Ogólnie w odniesieniu do właściwych sił skrawania, występujących podczas obróbki stopów aluminium można stwierdzić, że [30, 55]:

- 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 tychże sił w przypadku stali (w odniesieniu do niektórych stopów, np. Al-Si, są większe),
- właściwej siły skrawania nie można określić na podstawie składu chemicznego danego stopu oraz jego właściwości fizycznych, zależy ona także od innych czynników i można ją ustalić jedynie doświadczalnie.

Należy podkreślić, że różnorodność stopów aluminium pod względem skrawalności implikuje konieczność modyfikacji cech geometrycznych narzędzi w zależności od rodzaju obrabianego stopu. Wydaje się zasadne stwierdzenie, że narzędzia dla poszczególnych grup stopów, jakie wyodrębniono pod względem skrawalności, powinny różnić się niektórymi cechami geometrycznymi. Takich jednoznacznych zaleceń producenci narzędzi nie formułują. Ważniejsze sugestie w tym obszarze wiedzy technologicznej są następujące:

- dla stopów z grupy I zaleca się stosowanie „ostrej” geometrii, a więc zwiększonego kąta natarcia oraz rowka wiórowego o podwyższonej gładkości, co można uzyskać przez polerowanie powierzchni narzędzia lub stosowanie powłok narzędziowych zmniejszających adhezję;

- dla obróbki stopów z grupy III sugeruje się mniej ostrą geometrię oraz materiał o podwyższonej odporności na ścieranie, najkorzystniej ostrza z PKD lub ostrza z powłokami z PKD;
- materiały z grupy II, o najlepszej skrawalności mogą być obrabiane frezami węglowymi bez powłoki ochronnej, obniża to koszt narzędzia przy zachowaniu dobrej jego trwałości oraz korzystnych cech jakościowych powierzchni obrabianej.

3.4. Skrawalność stopów magnezu

Ze względów bezpieczeństwa najważniejszym, tzw. krytycznym wskaźnikiem skrawalności, w przypadku stopów Mg jest temperatura w strefie skrawania [47, 78, 79]. Definiuje ona jednoznacznie bezpieczeństwo podczas obróbki skrawaniem tych stopów.

Podczas skrawania na sucho oraz z minimalnym smarowaniem wykonywane są próby usuwania wiórów podczas frezowania lub wiercenia poprzez ich odsysanie przy krawędzi skrawającej narzędzia. Podczas skrawania stopów magnezu rozwiązanie takie ma pewne zalety [28]:

- ograniczenie rozproszenia wiórów (ryzyko przenoszenia ognia w inne miejsca),
- mniejsze zagrożenie wybuchem (zagrożenie dla cząstek poniżej 500 μ m),
- mniejsza ilość wiórów w strefie obróbki (mniejsze ryzyko uszkodzenia obrabiarzy),
- oddzielanie pyłu magnezowego przez separator odśrodkowy (eliminacja filtrów),
- możliwość prasowania pyłu na brykiet (mniejsza łatwopalność oraz ograniczenie zajmowanej przestrzeni).

Podczas frezowania stopów Mg zastosowanie mają następujące materiały narzędziowe:

- stal szybko tnąca (w przypadku niewielkich partii produkcyjnych),
- drobnoziarniste węgliki spiekane (powlekane np. warstwami TiAlN lub diamentowymi oraz niepowlekane),
- polikrystaliczny diament (PKD).

Dedykowane narzędzia do obróbki frezowaniem stopów magnezu powinny charakteryzować się tzw. „ostrą geometrią”. Narzędzia wykonywane, jako frezy pełnowęglkowe powinny posiadać: kąt natarcia γ w zakresie 15÷25°, kąt przyłożenia α w zakresie 12÷20°, kąt wzniosu linii śrubowej λ_s w przedziale 30÷40°. Dodatkowo narzędzia powinny posiadać: dużą przestrzeń rowków wiórowych (2 lub 3 ostrza pozwalające na dobre odprowadzanie wiórów), polerowane powierzchnie natarcia i przyłożenia. Redukcja liczby ostrzy pozwala na uzyskanie większych

rowków wiórowych oraz możliwość intensywniejszej obróbki, co może wpływać na [8, 35, 38, 55, 66, 70, 72, 77]:

- wydzielanie się mniejszej ilości ciepła tarcia,
- możliwość stosowania większych prędkości skrawania,
- mniejsze odkształcenia,
- obniżenie zużycia energii,
- lepszą jakość finalnej powierzchni.

Narzędzia diamentowe znajdują już od wielu lat szerokie zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, a ostatnio wyraźnie zyskują na popularności w dynamicznie rozwijającym się przemyśle lotniczym [67, 74]. Skrawanie stopów magnezu z wykorzystaniem wysokich prędkości skrawania oraz narzędzi PKD, umożliwia uzyskanie, jakości powierzchni porównywalnej z procesem szlifowania wykończeniowego [36, 55, 74].

Ogólnie należy przyjąć, że stopy magnezu są bardzo dobrze kształtowane przez metody obróbki ubytkowej. Elementy produkowane dla różnych gałęzi przemysłu, wykonywane ze stopów magnezu można obrabiać szybciej i ekonomiczniej niż w przypadku innych, stosowanych powszechnie materiałów konstrukcyjnych. Jak podają producenci stopów magnezu, stopy te można obrabiać czterokrotnie szybciej niż popularne stopy aluminium [8, 27, 55, 70, 71, 73, 76, 77, 84].

3.5. Czynniki wpływające na skrawalność stopów magnezu

Ze względu na sposób prowadzonej obróbki, do głównych problemów, które występują podczas skrawania stopów Mg można zaliczyć [4, 25, 44, 46, 52, 54, 70, 74, 76, 81]:

- podczas obróbki na sucho: ryzyko zapłonu wiórów, niedokładność kształtu i wymiarów (skutek odkształceń cieplnych), gorsza jakość powierzchni obrabianej (adhezja oraz tworzenie narostu), zmniejszoną trwałość narzędzia (obróbka stopów wzmacnianych), utrudnione usuwanie wiórów ze strefy obróbki;
- podczas obróbki z chłodzeniem emulsjami (cieczami mieszalnymi z wodą): utrudniony recykling wiórów, tworzenie się wodoru;
- podczas obróbki z chłodzeniem olejami (cieczami niemieszalnymi z wodą): utrudniony recykling wiórów, tworzenie się wodoru (w przypadku obróbki MQL), potrzeba czyszczenia elementów obrabianych oraz dostawanie się cząstek oleju do powietrza w formie aerozolu, możliwość tworzenia lokalnych „wyfuknięć” lub wybuchów mieszaniny powietrza i mgły olejowej (zamknięta przestrzeń obrabiarki).

3.6. Skrawalność stopów magnezu w warunkach obróbki konwencjonalnej i HSC

Dąży się do tego, aby frezowanie mogło być zarówno pierwszą a zarazem ostatnią operacją wykonywaną m.in. na elementach ze stopów lekkich. Charakterystyczne jest także to, że frezowanie jest z reguły obróbką zgrubną i wykończeniową elementów lotniczych czy motoryzacyjnych wytwarzanych ze stopów Mg. Istotne jest więc m.in. kształtowanie odpowiedniej chropowatości powierzchni [10, 36]. Nowoczesne narzędzia (np. PKD), wydajne techniki obróbki (np. HSM) oraz nowe możliwości obrabiarek CNC pozwalają na eliminację (często czasochłonnej) operacji szlifowania, bez pogorszenia jakości powierzchni po obróbce [83]. Dla przykładu zastosowanie strategii HSM pozwala na 4-krotne skrócenie czasu obróbki, bez pogorszenia jakości powierzchni, oraz dokładności kształtu podczas obróbki wirnika piasty wykonanego ze stopu Al 7075 T73 [41].

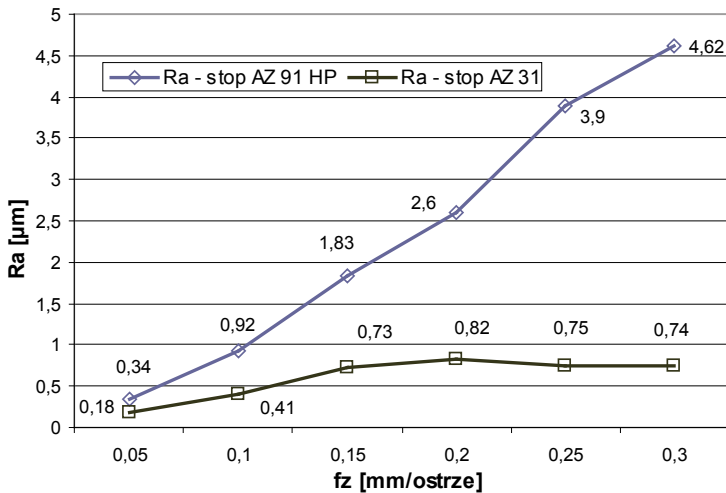
Już w latach siedemdziesiątych XX wieku podawano, że prędkość skrawania może wynosić: dla frezowania zgrubnego 1000m/min, frezowania wykończeniowego 2700m/min [57]. Od tamtych lat, aż do dziś ogólną zasadą doboru prędkości skrawania jest stosowanie takiej prędkości obrotowej, na jaką pozwala charakterystyka wrzeciona maszyny technologicznej. Mniejsze prędkości skrawania są stosowane tylko ze względu na możliwość powstawania dużych naprężeń własnych [14, 55].

Jako ograniczenie w stosowaniu wydajnych parametrów obróbki należy traktować wielkość i kształt wiórów oraz zjawisko fragmentowania (rozdrabniania) wiórów, powstających przy ściśle określonych warunkach skrawania [6, 37].

Ponieważ wytwarzanie elementów lotniczych, związane jest z usuwaniem dużej ilości materiału obrabianego, celowe staje się stosowanie efektywnej, wydajnej obróbki frezowaniem. Jest to podyktowane głównie możliwością skrócenia czasu maszynowego, wzrostem wydajności, a więc generowaniem oszczędności w procesie wytwórczym oraz spadkiem kosztów wytwarzania [36]. Dodatkowe korzyści [35], wynikające z obróbki szybkościowej to ograniczenie tworzenia się zadziórów, lepsze odprowadzanie wióra, zwiększona stabilność procesu, uproszczone oprzyrządowanie oraz niewielkie siły skrawania. W procesie obróbki szybkościowej [88] zostaje zminimalizowana deformacja wióra i jego zgmiot, dzięki czemu bardzo niewiele ciepła jest przekazywane do przedmiotu obrabianego oraz nie występuje istotne utwardzenie jego powierzchni. Ciepło powstałe podczas obróbki jest odprowadzane za pomocą wiórów i przedmiot nie ulega odkształceniu.

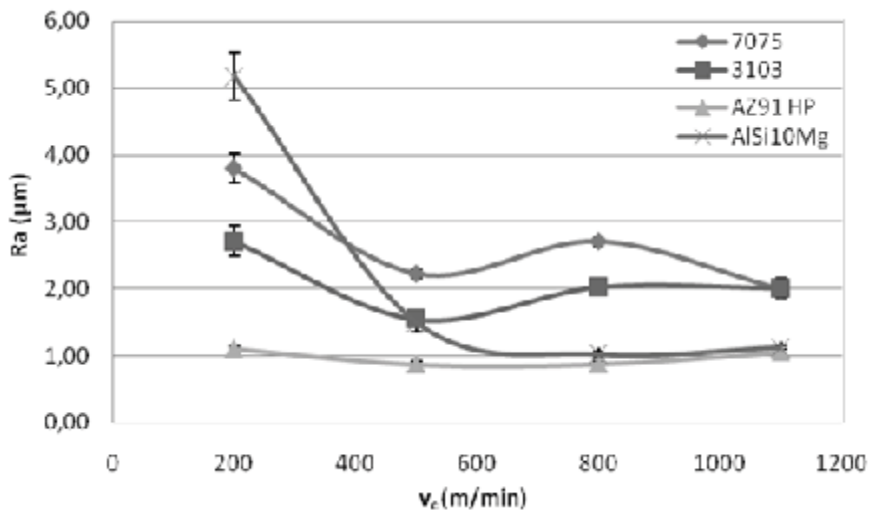
W wielu ostatnich pracach analizie poddaje się różnorodne wskaźniki skrawalności. **Jakość powierzchni** po obróbce frezowaniem jest zależna m.in. od rodzaju materiału narzędziowego oraz szeroko pojętej geometrii narzędzia. Podczas frezowania na sucho, głowicą frezarską z ostrzami PKD największy wpływ na zmianę parametru Ra miał posuw. Nastąpił wzrost (w przybliżeniu liniowy)

parametru Ra wraz ze wzrostem posuwu na ostrze. Podczas zmiany prędkości oraz głębokości skrawania nie obserwowano jednoznacznego ich wpływu, na jakość powierzchni obrabianej [22]. Podczas frezowania głowicą frezarską z ostrzami PKD, z zastosowaniem oleju, parametry chropowatości wyniosły: Rz $(4 \div 12) \mu\text{m}$ natomiast $Ra < 2 \mu\text{m}$, przy zmienności posuwu $(0,1 \div 0,6) \text{mm/ostre}$ [52]. Podczas frezowania stopu AZ31B z chłodzeniem przy pomocy sprężonego powietrza strefy styku obserwowano, że chropowatość wzrasta wraz ze wzrostem posuwu i liczby ostrzy, a pozostaje prawie bez zmian w zakresie $v_c = (116 \div 311) \text{m/min}$. Dlatego zaleca się redukcję liczby ostrzy do minimum [32]. Podczas frezowania frezami trzpieniowymi zarówno w zakresie obróbki konwencjonalnej, jak i przy zwiększonej prędkości skrawania [36, 81, 84, 85] najlepszą jakość powierzchni uzyskano po obróbce narzędziem z ostrzem PKD. Na rys. 3.10 przedstawiono wpływ zmiany posuwu na parametr chropowatości Ra. Obróbkę prowadzono narzędziem węglkowym o średnicy $d=12 \text{mm}$. Szerokość frezowania wyniosła $a_e=10 \text{mm}$. Można zaobserwować istotne różnice w skrawalności tych stopów. W ocenie ogólnej [81] należy stwierdzić, że zarówno stop AZ91HP jak i stop AZ31 są dobrze obrabialne, w przedstawionych warunkach skrawania, jednak ze względu na chropowatość po obróbce stop AZ31 jest znacznie lepiej obrabialny od stopu AZ91HP.



Rys. 3.10. Wpływ posuwu na chropowatość powierzchni (parametr Ra) po frezowaniu frezami trzpieniowym węglkowym stopów AZ91HP i AZ31, $v_c=200 \text{m/min}$, $a_p=6 \text{mm}$ [81]

Na rys. 3.11 przedstawiono wpływ zmiany prędkości skrawania na parametr chropowatości Ra. Jako narzędzie wykorzystano frez węglkowy o geometrii typu Kordell, o średnicy $d=16 \text{mm}$. Najlepszą jakość powierzchni po obróbce uzyskano dla stopu AZ91HP.

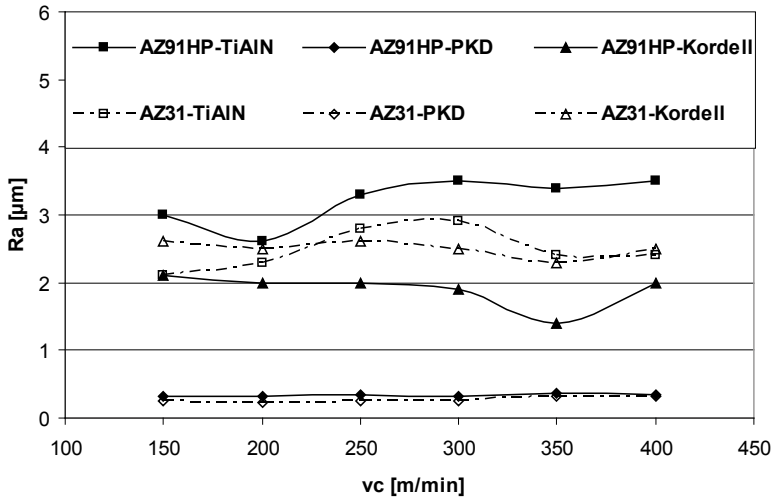


Rys. 3.11. Wpływ prędkości skrawania na parametr Ra po frezowaniu stopów lekkich, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=3\text{mm}$ [45]

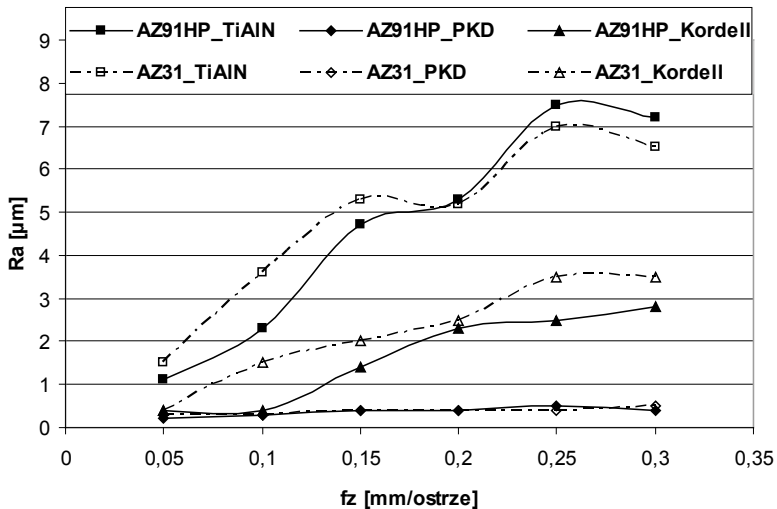
Na rys. 3.12 przedstawiono wpływ rodzaju narzędzia oraz zmiany parametrów technologicznych na parametr chropowatości Ra po frezowaniu na sucho stopów Mg: AZ31 i AZ91HP. Do obróbki zastosowano frezy o średnicy $d=16\text{mm}$. Szerokość frezowania ustalono na poziomie $a_e=14\text{mm}$. Łatwo zaobserwować, że wzrost parametrów obróbki nie wpływa istotnie na zmianę chropowatości powierzchni w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD. Można wnioskować, że w tym przypadku istnieje możliwość prowadzenia efektywnej, wydajnej obróbki frezowaniem bez pogorszenia jakości powierzchni finalnej. Najgorszą jakość powierzchni po frezowaniu uzyskano stosując narzędzie węglikowe z powłoką TiAlN.

W celach porównawczych analizowano również wpływ obecności powłoki narzędziowej, na jakość powierzchni po obróbce. Porównano jakość powierzchni po frezowaniu w przypadku zastosowania dwóch narzędzi: frezu węglikowego z powłoką TiAlN oraz frezu węglikowego bez powłoki. Lepszą jakość powierzchni uzyskano dla narzędzia bez powłoki. W przypadku parametru Ra różnica między poszczególnymi narzędziami wyniosła ok. $1\mu\text{m}$, natomiast w przypadku parametru Rz ok. $7\mu\text{m}$. Próbę przeprowadzono w zakresie następujących parametrów technologicznych: $v_c=400\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$, $a_e=14\text{mm}$. Jak łatwo zauważyć obecność powłoki TiAlN powoduje pogorszenie jakości powierzchni. Jest to prawdopodobnie związane z pogorszeniem „ostrości” (zaokrągleniem) krawędzi skrawającej po obróbce pokryciowej [36, 75].

a)



b)



Rys. 3.12. Wpływ parametrów technologicznych na jakość powierzchni po frezowaniu stopów magnezu: a) wpływ prędkości skrawania, $f_z=0,15\text{mm/strze}$, $a_p=6\text{mm}$; b) wpływ posuwu na ostrze, $vc=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [36, 84, 85]

Podczas wytwarzania elementów maszyn i urządzeń zwraca się szczególną uwagę na taki dobór parametrów, aby osiągnąć stałe i jak najlepsze efekty obróbki (np. chropowatość powierzchni obrobionej). W przypadku frezowania wykończeniowego, jako priorytet należy uważać wykonanie przedmiotu o dokładnych

(pożądanych) wymiarach i kształtach oraz jakości powierzchni nieprzekraczającej dopuszczalnej chropowatości. Przy czym niezwykle ważne jest to, aby „maksymalizacja” efektywności wytwarzania odbywała się bez pogorszenia stabilności procesu oraz jakości powierzchni [23, 24, 35].

Ważnym aspektem staje się analiza wpływu parametrów technologicznych (v_c , f_z , a_p) oraz kąta natarcia γ na chropowatość powierzchni obrobionej (np. w przypadku frezowania stopu magnezu AZ91HP). Liczna grupa parametrów chropowatości, pozwala na bardziej efektywną ocenę jakości badanych powierzchni. Na podstawie otrzymanych wyników możliwe jest przedstawienie następujących wniosków ogólnych [23, 24]:

- Wyższą jakość powierzchni po obróbce (mniejsze parametry chropowatości) uzyskano w przypadku zastosowania narzędzia o kącie natarcia $\gamma=5^\circ$.
- W przedziale zmienności posuwu $f_z=0,05\div 0,3$ [mm/ostre] najmniejszą wartość parametru chropowatości uzyskano dla najmniejszej wartości posuwu, natomiast w badanym przedziale prędkości skrawania $v_c=400\div 1200$ [m/min], najmniejszą wartość parametru chropowatości uzyskano dla największej prędkości skrawania.
- Głębokość skrawania nie miała istotnego wpływu na zmianę parametrów chropowatości mierzonych na powierzchni czołowej analizowanej próbki, oznacza to, że bardziej celowe jest zwiększanie głębokości skrawania niż posuwu przy próbie poprawy wydajności objętościowej skrawania.
- W zakresie głębokości skrawania $a_p=(0,5\div 3)$ mm, mniejsze wartości parametrów chropowatości uzyskano przy zastosowaniu mniejszego posuwu ($f_z=0,05$ mm/ostre). Należy jednak pamiętać, że zmniejszanie posuwu należy również prowadzić racjonalnie, gdyż za mały posuw może skutkować poślizgiem ostrza po materiale obrabianym i zwiększaniem temperatury w strefie skrawania.
- W przypadku konieczności zwiększenia wydajności objętościowej, korzystniej jest zwiększać głębokość skrawania a_p niż posuw f , gradient wzrostu chropowatości przy zwiększaniu posuwu jest „silniejszy” niż w przypadku zmiany głębokości skrawania, korzystnie jest także zwiększać prędkość skrawania.

Analiza **sił w strefie skrawania** jest istotnym zagadnieniem, ze względu na deformacje w strefie tworzenia wióra oraz odkształcenia obrabianych elementów. Siły skrawania wpływają również na tzw. „odkształconą grubość wióra” [17]. Spadek „nieodkształconej grubości wióra” powoduje zmianę kąta ścinania i w konsekwencji wzrost temperatury w płaszczyźnie ścinania. Gdy zmniejszamy „nieodkształconą grubość wióra”, właściwa siła skrawania (stosunek siły skrawania do przekroju poprzecznego wióra) zwiększa się. Energia ścinania na jednostkę objętości, zwiększa ilość usuwanego metalu wraz ze wzrostem siły skrawania, co powoduje wzrost temperatury skrawania w płaszczyźnie ścinania.

Okresowe zmiany (wahania) sił skrawania mogą być powodowane przez adhezję i zjawisko narostu. Wymienione czynniki mogą wpływać z kolei na obniżenie jakości powierzchni i dokładności wymiarowo-kształtowej.

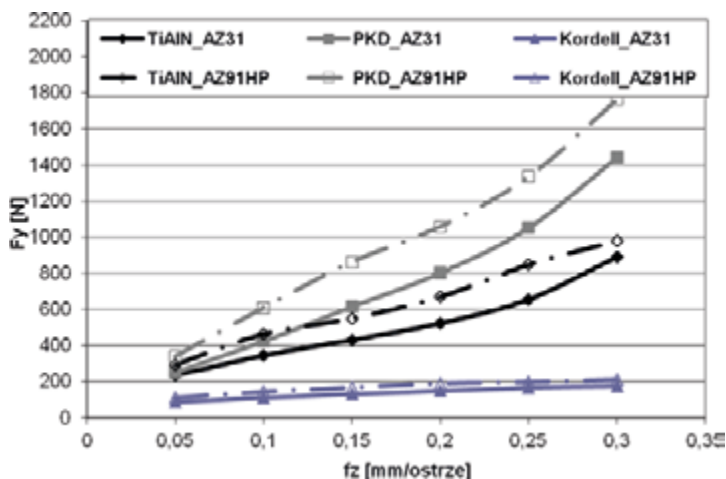
Podczas frezowania głowicą z ostrzami PKD z chłodzeniem za pomocą oleju, stopu AZ91HP, siły skrawania przyjmują małe wartości i narastają liniowo wraz ze zwiększaniem posuwu [52].

Szczególnie istotne jest również, że podczas obróbki HSM wraz ze wzrostem prędkości skrawania (przy stałej wydajności objętościowej procesu) maleją siły skrawania, dzięki temu możliwa jest obróbka frezowaniem elementów posiadających cienkie ścianki (np. do 0,1 mm) [88].

Umownie przyjęto podział na obróbkę konwencjonalną oraz HSM. Przyjmuje się, że HSM zaczyna się wtedy, gdy zwiększając prędkość skrawania v_c otrzymujemy spadek sił skrawania, co można wyrazić poprzez [2]:

- $\partial F/\partial v_c < 0$, w przypadku HSM,
- $\partial F/\partial v_c > 0$, w przypadku obróbki konwencjonalnej.

Z ostatnio prowadzonych badań wynika, że większy wpływ na siły skrawania oraz ich amplitudy obserwuje się zmieniając posuw na ostrze, niż prędkość skrawania (analiza ta dotyczy zarówno obróbki konwencjonalnej jak i szybkościowej). Zmiana posuwu na ostrze powoduje w przybliżeniu liniowy przyrost składowych siły skrawania oraz ich amplitudy. W większości przypadków, wyższe wartości sił skrawania obserwowano w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD. Nie zaobserwowano znacznych różnic w wartości sił skrawania dla stopów AZ31 i AZ91HP w całym zakresie posuwu oraz prędkości skrawania [38, 82, 84, 86]. Na rys. 3.13 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze na składową F_y w przypadku zastosowania różnych materiałów narzędziowych oraz dwóch stopów magnezu.



Rys. 3.13. Wpływ posuwu na ostrze f_z na wartość składowej siły skrawania F_y ; $v_c=300\text{m}/\text{min}$, $a_p=6\text{mm}$ [38, 83, 84]

Podczas projektowania procesu technologicznego zwraca się szczególną uwagę na taki dobór parametrów, aby osiągnąć stałe i jak najlepsze efekty. Niezwykle istotnym wskaźnikiem procesu jest jego stabilność. Wartości parametrów technologicznych, czy sztywność obrabiarki zalicza się do najważniejszych czynników wpływających na stabilność procesu. Ważnym aspektem staje się analiza zależności zmiany parametrów technologicznych (v_c , f_z , a_p) oraz kąta natarcia γ w funkcji zmiany sił oraz amplitud sił skrawania. Na podstawie analizy sił skrawania i ich amplitudy podczas frezowania stopu magnezu AZ91HP, możliwe jest sformułowanie następujących wniosków ogólnych [23, 24]:

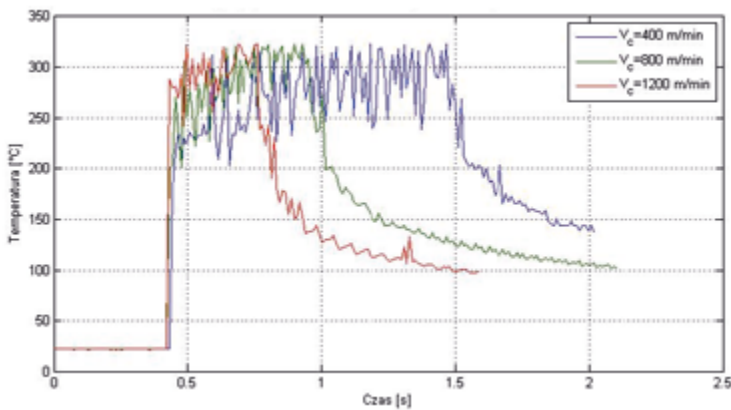
- Mniejsze wartości sił skrawania i ich amplitud, świadczące o lepszej stabilności procesu zaobserwowano dla narzędzia o kącie natarcia $\gamma=30^\circ$. Jest to także istotne spostrzeżenie w kontekście bezpieczeństwa, gdyż mniejsze siły w strefie skrawania generują niższe temperatury, co jest istotne ze względu na ryzyko zapłonu wiórów magnezu podczas skrawania.
- Zwiększanie głębokości skrawania powoduje proporcjonalny przyrost składowych sił skrawania i ich amplitud.
- Zwiększenie wartości posuwu do 0,15mm/ostrze w przypadku różnych głębokości skrawania przyczyniło się do wzrostu składowych sił skrawania, w porównaniu do sytuacji gdy $f_z=0,05$ mm/ostrze.
- Zmiana wartości posuwu na ostrze (w zakresie $f_z=0,05\div 0,15$ mm/ostrze) powodowała wzrost składowych sił skrawania a następnie ich stabilizację (dla $f_z=0,15\div 0,3$ mm/ostrze).

Jak już wspomniano siły skrawania wpływają w bezpośredni sposób na **temperaturę w strefie skrawania**. Wzrost sił skrawania może powodować wzrost temperatury w strefie skrawania. Ta z kolei jest newralgicznym zagadnieniem z punktu widzenia bezpieczeństwa obróbki stopów magnezu. Przy pewnych, szczególnie niekorzystnych warunkach skrawania, generowana podczas obróbki temperatura, może spowodować niekontrolowany zapłon wióra. Maksymalna wartość generowanej temperatury obserwowana jest w obszarze związanym bezpośrednio ze strefą formowania wióra. Proces deformacji (odkształceń plastycznych) wióra dotyczy niewielkiego obszaru całej strefy skrawania. Wzrost temperatury w strefie skrawania, związany jest więc ściśle z czasem formowania (tworzenia) się wióra, gdyż w późniejszym etapie frezowania nie następuje już wzrost temperatury formowanego wióra. Literatura [1, 17, 34, 49, 50] poddaje rozważaniom różne sposoby oceny temperatury podczas skrawania. Nowoczesne procesy frezowania są związane ze zjawiskami niezwykle dynamicznymi, dlatego urządzenia pomiarowe powinny dysponować odpowiednio wysoką częstotliwością próbkowania [78]. Podczas próby toczenia [1] analizie cieplnej poddaje się niewielki obszar, w odległości ok. 40 μ m od powierzchni natarcia narzędzia. Analiza ta oparta jest na pomiarach z użyciem kamery termowizyjnej Flir SC3000. Przedstawiana metodyka pomiaru pozwala na analizę zarówno rozkładu temperatury wzdłuż krawędzi skrawającej, jak i pomiar

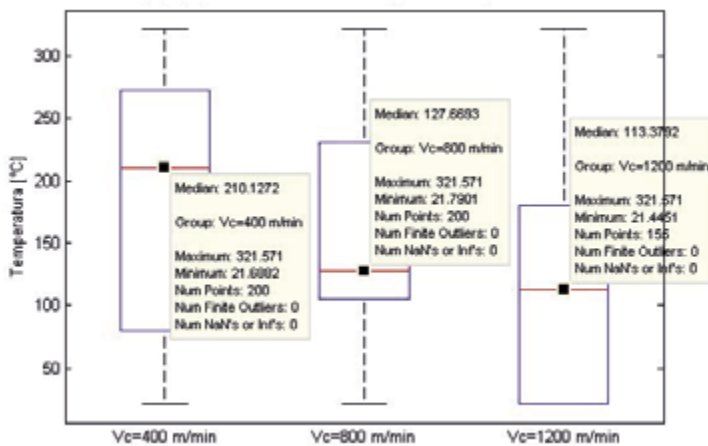
temperatury wióra. Takie sposoby pomiarów są niemożliwe z kolei w przypadku stosowania termopar obcych (najczęściej pomiar temperatury średniej, w określonym punkcie). Pomiary z użyciem termopar wykonywane są poprzez umieszczenie ich w narzędziu skrawającym lub przedmiocie obrabianym. Stosując takie rozwiązania możemy mierzyć odpowiednio temperaturę powierzchni przyłożenia/natarcia narzędzia [17, 83], bądź temperaturę generowaną w przedmiocie obrabianym [49]. W drugim przypadku, metoda pomiaru może posłużyć, jako porównawcza, gdyż pomiar temperatury odbywa się w pewnej odległości od strefy styku narzędzia z przedmiotem obrabianym. Wartości pomiaru temperatury, mierzone przy pomocy termopar umieszczonych w przedmiocie obrabianym, są zbliżone do tych obserwowanych w przypadku zastosowania pirometrii optycznej. Umieszczenie termopary w przedmiocie obrabianym podczas operacji frezowania powoduje, że istnieje możliwość pomiaru tzw. „średniej temperatury powierzchni przyłożenia narzędzia” w momencie styku narzędzia z termoparą (w chwili zniszczenia termopary obcej) [17]. Uważa się, że temperatura powierzchni przyłożenia jest niewiele niższa od temperatury skrawania, czyli temperatury mierzonej na powierzchni natarcia narzędzia. Wynika to z faktu, że tzw. „nieodkształcona grubość wióra” (czyli głębokość skrawania) w tym przypadku jest raczej niewielka, porównywalna z promieniem zaokrąglenia krawędzi skrawającej.

Metoda pomiaru temperatury, podczas frezowania, przy pomocy termopar obcych, mocowanych w przedmiocie obrabianym, nie pozwala na pomiar temperatury w strefie skrawania, zwłaszcza w zakresie głębokości skrawania stosowanych w przemyśle. Możliwym jest zastosowanie prezentowanej metody pomiaru wyłącznie dla bardzo małych głębokości skrawania, porównywalnych z tzw. „nieodkształconą grubością wióra”, proporcjonalną do promienia zaokrąglenia narzędzia. Nie odzwierciedla to jednak realnych warunków obróbki [83]. Również podczas frezowania z zastosowaniem metody MQL [50], używano kamery termowizyjnej do określania temperatury wiórów.

Najważniejsza jest więc analiza warunków skrawania między powierzchnią obrabianą a obrobioną, czyli obszaru, w którym tworzy się wiór. Przy założeniu realnych, stosowanych w przemyśle parametrów technologicznych obróbki, najbardziej wskazane jest stosowanie wysokiej klasy kamery termograficznej. Dlatego w najnowszych badaniach [89, 90] proponowaną metodą pomiaru temperatury wiórów jest użycie szybkiej kamery termowizyjnej, np. Flir SC6000HS/SC8000HS, pozwalającej na pomiar z częstotliwością 400Hz. Na rys. 3.14 przedstawiono przebiegi czasowe zmian temperatury podczas frezowania stopu magnezu AZ31.



Rys. 3.14. Pomiary temperatury w strefie skrawania przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej, rysunek przedstawiający wykres zmienności temperatury w sekwencji zdjęć termicznych podczas skrawania narzędziem z geometrią typu Kordell stopu magnezu AZ31 (wpływ prędkości skrawania v_c na temperaturę wióra w strefie skrawania); $f_z=0,15\text{mm}/\text{ostrze}$, $a_p=6\text{mm}$ [89]

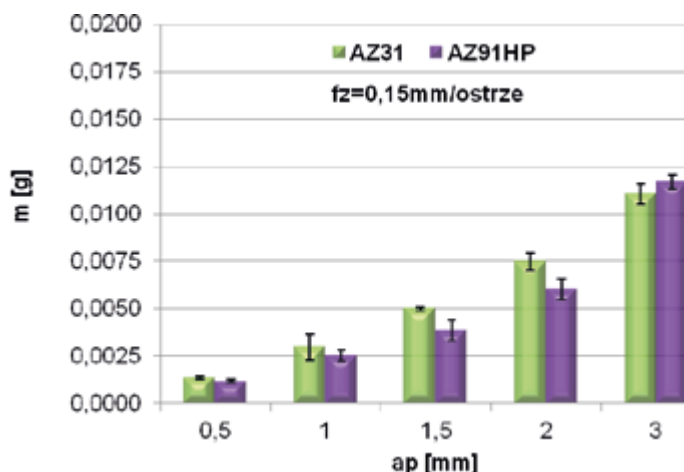


Rys. 3.15. Wpływ prędkości skrawania v_c na zmiany temperatury wióra w strefie skrawania, na wykresie uwzględniono wszystkie dane z sekwencji zdjęć termicznych; narzędzie z geometrią typu Kordell, stop Mg AZ31, $f_z=0,15\text{mm}/\text{ostrze}$, $a_p=6\text{mm}$ [89]

Na rys. 3.15 przedstawiono wykresy typu „Boxplot”. Wykres tego typu pozwala na zobrazowanie takich cech jak położenie, rozproszenie i kształt rozkładu empirycznego badanej cechy. Z punktu widzenia bezpieczeństwa obróbki interesują nas przede wszystkim wartości maksymalne temperatury, jakie zaobserwowano w procesie skrawania, dlatego analiza obserwowanych temperatur dotyczy wszystkich

danych z sekwencji zdjęć termicznych. Wykres przedstawia (podobnie jak rys. 3.14) wpływ zmiany prędkości skrawania na temperaturę wiórów podczas skrawania narzędziem z geometrią typu Kordell stopu magnezu AZ31. Najwyższe temperatury, jakie uzyskano z pomiarów kamerą termowizyjną są znacznie niższe niż te, które zaobserwowano w badaniach zapłonu wiórów poza obrabiarką. Dlatego też, bezpieczny proces frezowania stopów AZ31 i AZ91HP, może być prowadzony przy parametrach znacznie przekraczających stosowane aktualnie w przemyśle [37].

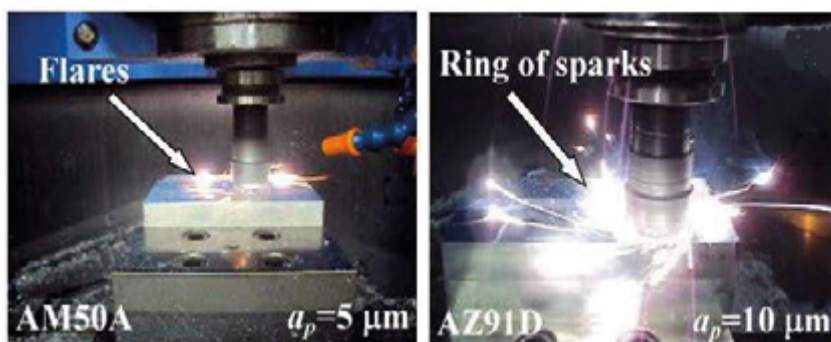
Na niebezpieczeństwo zapłonu wiórów podczas obróbki ma wpływ **wielkość wióra**, co jest bezpośrednio związane z jego masą. Ze względu na niebezpieczeństwo zapłonu, wióry magnezowe powinny być jak największe. Analiza masy wiórów jest ważnym wskaźnikiem bezpieczeństwa obróbki stopów Mg, badania takie są zasadne, ze względu na możliwość fragmentowania wiórów. Zmiana masy wiórów nie musi być proporcjonalna (jak mogłoby się wydawać) do wzrostu parametrów technologicznych obróbki. Dla przykładu w przypadku zastosowania narzędzia węglkowego z powłoką TiAlN, zmiana prędkości skrawania w zakresie $v_c=(150\div 400)\text{m/min}$, nie zmienia średniej masy wióra. Oznacza to, że fragmentacja wióra nie zależy od tego parametru. Ponadto w przypadku wymienionego narzędzia, nie obserwowano istotnych zmian w obszarze deformacji wiórów, wzrost $a_p=(0,5\div 3)\text{mm}$ oraz $f_z=(0,05\div 0,3)\text{mm/ostre}$ powoduje w zasadzie zgodnie z oczekiwaniami, liniowy przyrost masy wiórów. Niestety w pewnych obszarach zachodzi niekorzystne zjawisko fragmentowania wiórów, czyli występowania frakcji pośrednich wiórów [37]. Analogiczna sytuacja ma miejsce w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD. Na rys. 3.16 przedstawiono wpływ zmiany głębokości skrawania a_p na masę frakcji wiodącej wiórów.



Rys. 3.16. Wpływ głębokości skrawania a_p na masę wiórów po frezowaniu w przypadku zastosowania narzędzia węglkowego z powłoką TiAlN; $v_c=300\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$ [37]

Kluczowym zagadnieniem podczas obróbki stopów magnezu jest ocena **ryzyka zapłonu wiórów podczas obróbki** [6]. Autorzy [4, 25, 90] poruszają tematykę kontrolowanego zapłonu wiórów podczas skrawania. Proponowana obserwacja dotyczy frezowania z bardzo małymi głębokościami skrawania (od kilku do kilkuset μm). W ostatnich publikacjach analizie poddawany jest tzw. punkt zapłonu drobnych wiórów, opiłków lub sproszkowanego magnezu. W badaniach analizuje się również wpływ dodatków stopowych (m.in. Ce, Al, Y) na punkt zapłonu i odporność na utlenianie stopów magnezu [42, 43, 62, 91].

Na rys. 3.17 przedstawiono zapłon wiórów Mg podczas frezowania stopu AM50A oraz AZ91D. Obróbkę prowadzono z bardzo małą głębokością skrawania, maksymalnie rzędu kilkuset μm .



Rys. 3.17. Zapłon wiórów ze stopów magnezu AM50A oraz AZ91D podczas frezowania [4, 25]

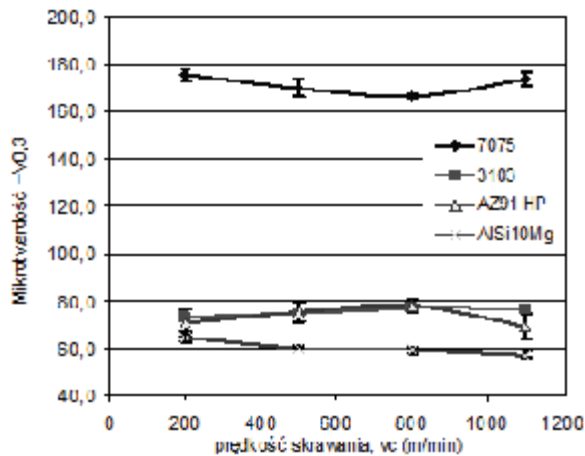
Kolejnym wskaźnikiem określającym bezpieczeństwo podczas obróbki jest **czas do zapłonu wiórów**, analizowany na specjalnym stanowisku badawczym poza obrabiarką. Należy podkreślić, że zmierzony, rzeczywisty czas do zapłonu wiórów jest wielokrotnie wyższy od rzeczywistego czasu obejmującego proces formowania się wióra, a więc tego czasu w którym temperatura stale wzrasta. Rzeczywisty czas procesu formowania się wióra, dla przedziału prędkości skrawania $v_c=(150\div 1200)\text{m/min}$, wynosi odpowiednio ok. $(0,01\div 0,001)\text{s}$ [38, 39].

Na rys. 3.18 przedstawiono porównanie wpływu prędkości skrawania i posuwu na ostrze na **mikrotwardość** stopów Al. oraz Mg po obróbce frezowaniem narzędziem węglkowym o geometrii typu Kordell.

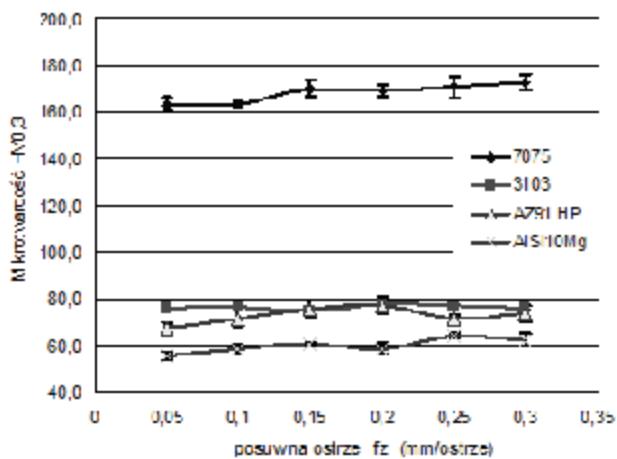
Efektywnej oraz wydajnej obróbce frezowaniem stopów Mg może przeciwstawić się fakt znacznego umocnienia warstwy wierzchniej, zobrazowany poprzez wzrost mikrotwardości oraz wzrost naprężeń własnych. Można znaleźć prace [8, 30, 36, 44] dotyczące wpływu parametrów technologicznych oraz sposobu obróbki na mikrotwardość powierzchni stopów lekkich. Ogólnie należy stwierdzić, że stopy magnezu cechuje twardość na poziomie ok. 100HB [38]. Badania twardości stopów Mg-Al-Zn pozwalają określić wpływ stężenia Al. (umocnienia roztworo-

wego), oraz zastosowanego rodzaju obróbki cieplnej i powierzchniowej na zmiany właściwości materiałów.

a)



b)

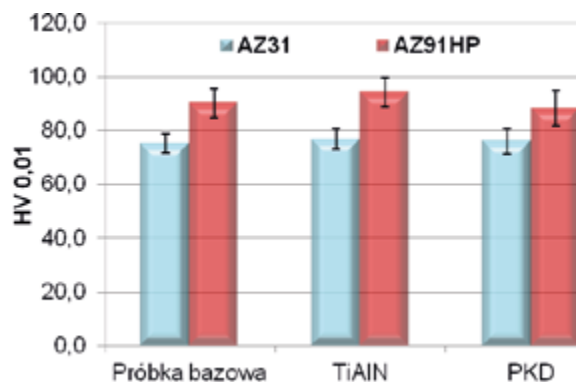


Rys. 3.18. Wpływ: a) prędkości skrawania v_c , b) posuwu na ostrze f_z na mikrotwardość stopów lekkich [45]

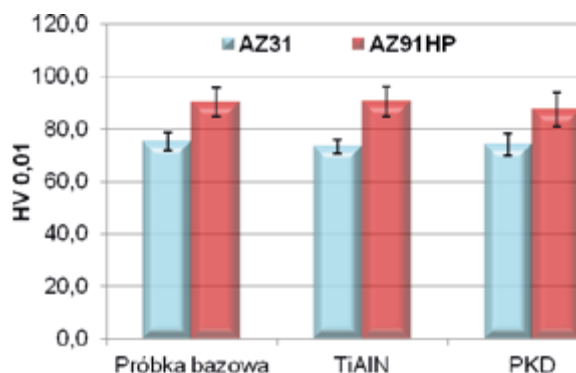
Na rys. 3.19 przedstawiono wpływ parametrów obróbki na mikrotwardość powierzchni po frezowaniu różnymi narzędziami. Badania przeprowadzono w oparciu o normę PN-EN ISO 6507-1: *Metale – Pomiar twardości sposobem Vickersa – Część 1: Metoda badań*. Analizowano mikrotwardość powierzchni oraz mikrotwardość warstwy wierzchniej po frezowaniu. Z przedstawionych badań wynika, że nie stwierdzono wpływu różnych typów narzędzi oraz maksymalnych

(w analizowanym eksperymencie) parametrów technologicznych frezowania na wartość mikrotwardości. Różnice parametrów mikrotwardości dotyczące obróbki różnymi narzędziami są w zasadzie z technologicznego punktu widzenia nieistotne.

a)



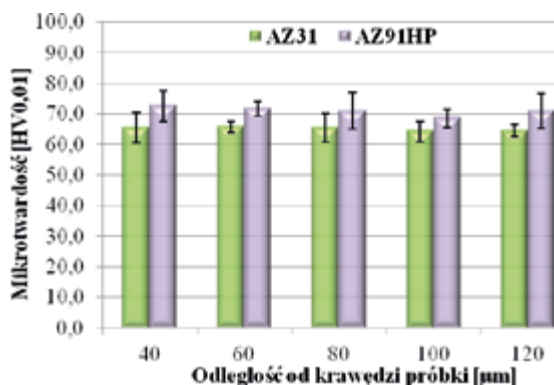
b)



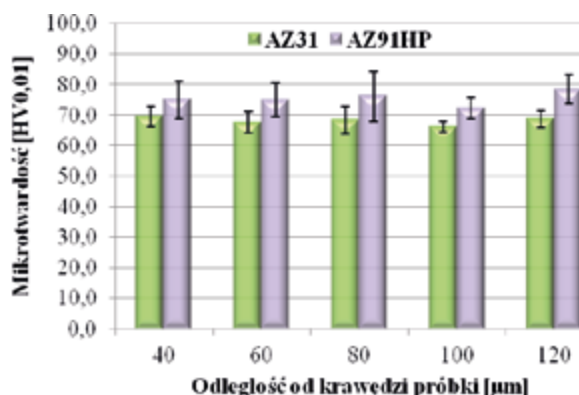
Rys. 3.19. Wpływ parametrów obróbki frezowaniem na mikrotwardość: a) wpływ prędkości skrawania: próbka bazowa ($v_c=150\text{m/min}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, $a_p=0,5\text{mm}$), TiAlN/PKD $v_c=1200\text{m/min}$ ($f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$); b) wpływ posuwu na ostrze: próbka bazowa ($v_c=150\text{m/min}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, $a_p=0,5\text{mm}$), TiAlN/PKD $f_z=0,3\text{mm/ostre}$ ($v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$) [80]

Rys. 3.20 przedstawia mikrotwardość warstwy wierzchniej, obserwowaną na zglądach poprzecznych. Analizowano stopień umocnienia ze względu na maksymalne (w analizowanym eksperymencie) parametry technologiczne obróbki. Nie stwierdzono również istotnego wpływu parametrów technologicznych frezowania oraz rodzaju narzędzia na umocnienie warstwy wierzchniej badanych stopów magnezu. Mikrotwardość próbki „bazowej”, obrobionej z parametrami technologicznymi: $a_p=0,5\text{mm}$, $v_c=150\text{m/min}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$ wyniosła odpowiednio: dla stopu AZ31 ok. 70HV, dla stopu AZ91HP ok. 80HV.

a)



b)



Rys. 3.20. Mikrotwardość warstwy wierzchniej stopów magnezu, w przypadku frezowania: a) narzędziem z ostrzem PKD: prędkość skrawania $v_c=1200\text{m/min}$ ($f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$); b) narzędziem węglkowym z powłoką TiAlN: posuw na ostrze $f_z=0,3\text{mm/ostre}$ ($v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$) [80]

Ważniejsze uwagi i wnioski:

1. Stopy magnezu są materiałami o dobrej obrabialności. Nie relacjonowane w tej pracy badania wskazują na relatywnie do innych materiałów wyjątkowo długi okres trwałości narzędzi.
2. Obróbka stopów magnezu charakteryzuje się dobrą stabilnością w rozumieniu dynamiki skrawania.
3. Jakość powierzchni po frezowaniu może być, przy stosowaniu odpowiednich technologicznych parametrów obróbki, porównywalna do efektów uzyskiwanych po operacjach obróbki ścierniej.
4. Proces deformacji warstwy wierzchniej podczas skrawania nie wpływa w sposób istotny na efekt umocnienia.

5. Temperatura w strefie skrawania, obserwowana dla technologicznych parametrów obróbki znacznie przekraczających aktualnie stosowane w przemyśle, nie stanowi zagrożenia dla zapłonu wiórów nawet w warunkach obróbki na sucho.
6. Przy obróbce stopów magnezu obserwuje się zjawisko fragmentowania wiórów, należy go unikać, drobne wióry wykazują większą skłonność do samozapłonu niż większe frakcje wiórów.

Literatura

1. Abukhshim N.A., Mativenga P.T., M.A. S.: *Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining*. „International Journal of Machine Tools & Manufacture” 46/2006, s. 782–800.
2. Adamski W.: *Manufacturing development strategies in aviation industry*. „Advances in Manufacturing Science and Technology” 34/2010, s. 73–84.
3. Adamski W.: *Wybrane kierunki zwiększania wydajności procesów skrawania*. „Mechanik” 5-6/2009, s. 540–546.
4. Akyuz B.: *Machinability of magnesium and its alloys*. TOJSAT: The Online Journal of Science and Technology, 1, July 2011. 31–38.
5. Andrae P.: *High-Efficiency Machining*. „Manufacturing Engineering” 4/2000, s. 82–96.
6. Arai M., S. S., M. O., H.I. S.: *Chip Control in Finish Cutting of Magnesium Alloy*. „Journal of Materials Processing Technology” 62/1996.
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. Avedesian M.M., Baker H.: *Magnesium and Magnesium Alloys; Fabrication, Finishing and Inspection: Machining*. „ASM International Handbook Committee” /1999, s. 127–137.
9. Barwinek M.: *Doskonale technicznie narzędzia skrawające firmy Fraisa (ITA)*. „Mechanik” 2/2013, s. 102.
10. Bhowmick S., Lukitsch M.J., Alpas A.T.: *Dry and minimum quantity lubrication drilling of cast magnesium alloy (AM60)*. „International Journal of Machine Tools & Manufacture” 50/2010, s. 444–457.
11. Burek J., Płodzień M.: *Wysoko wydajna obróbka części ze stopów aluminium o złożonych kształtach*. „Mechanik” 7/2012, s. 542–549.
12. 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.
13. Cichosz P.: *Obróbka skrawaniem – wysoka produktywność*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław, 2007.

14. Danilenko B.D.: *Selecting the Initial Cutting Parameters in Machining Magnesium Alloys*. „Russian Engineering Research” 29/2009, s. 316–318.
15. 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.
16. 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.
17. F.Z. F., L.C. L., X.D. L.: *Mean Flank Temperature Measurement in High Speed Dry Cutting*. „Journal of Materials Processing Technology” 167/2005, s. 119–123.
18. Feld M.: *Obróbka skrawaniem stopów aluminium*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa, 1984.
19. 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.
20. Górski E.: *Obróbka skrawaniem*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne. Warszawa, 1982.
21. Grzesik W.: *Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych*. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne. Warszawa, 2010.
22. Guo H., Zuo D.W., Wu H.B., Xu F., Tong G.Q.: *Prediction on milling distortion for aero-multi-frame parts*. „Materials Science and Engineering: A” 499(1-2)/2009, s. 230-233.
23. Gziut O., *Fragmentowanie wiórów w obróbce frezowaniem stopów magnezu*, in *Praca inżynierska 2013*: Lublin.
24. Gziut O., Kuczmaszewski J., Zagórski I.: *The influence of technological parameters and geometric features of a cutting edge on cutting forces during AZ91HP alloy milling*. „Advances in Manufacturing Science and Technology” 38/2014.
25. Hou J.Z., Zhou W., Zhao N.: *Methods for Prevention of Ignition during Machining of Magnesium Alloys*. „Key Engineering Materials” /2010, s. 447–448.
26. Hovsepian P.E., Luo Q., Robinson G.: *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.
27. Jądrzyk P.: *Obróbka stopów magnezu narzędziami firmy MAPAL*. „Mechanik” 3/2008, s. 186-187.
28. Jemielniak K., *Obróbka na sucho i z minimalnym smarowaniem*, Konferencja NT – Innowacyjne technologie w budowie maszyn, Poznań 2005.
29. Jemielniak K.: *Obróbka skrawaniem*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 2004.
30. John P.: *Machining of products*. „European aluminium association” /1994.

31. Kaczmarek J.: *Podstawy obróbki wiórowej, ściernej i erozyjnej*. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne. Warszawa, 1971.
32. Kim J.D., Lee K.B.: *Surface Roughness Evaluation in Dry-Cutting of Magnesium Alloy by Air Pressure Coolant*. „Engineering” 2/2010, s. 788-792.
33. Kishawy H.A., Dumitrescu M., Ng E.G., Elbestawi M.A.: *Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy*. „International Journal of Machine Tools and Manufacture” 45(2)/2005, s. 219-227.
34. Korkut I., Boy M., Karacan I., Seker U.: *Investigation of chip-back temperature during machining depending on cutting parameters*. „Materials and Design 28” 28/2007, s. 2329–2335.
35. 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.
36. Kuczmazewski J., Zagórski I.: *Badania chropowatości po frezowaniu stopów magnezu AZ31 i AZ91HP*. „Mechanik” 12/2013, s. 999-1004.
37. Kuczmazewski J., Zagórski I.: *Badania masy, temperatury zapłonu oraz temperatury wiórów podczas skrawania wybranych stopów magnezu*. „Mechanik” 10/2012, s. 824-828.
38. Kuczmazewski J., Zagórski I.: *Badania sił skrawania i ich amplitud podczas frezowania stopów magnezu*. „Postępy Nauki i Techniki” 12/2012, s. Postępy Nauki i Techniki.
39. Kuczmazewski J., Zagórski I., *Some problems of safe machining of magnesium alloys*, in *9th International Conference on Magnesium Alloys and their Application 2012*: Vancouver, Canada.
40. 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.
41. Leigh E., Tlustý J., Schueller J., *Applying high-speed machining techniques on rotor grip configurations*, in *Presented at the American Helicopter Society 55th Annual Forum* May.25–27.1999: Montréal, Quebec, Canada. s. 1-16.
42. Lin P.-Y., Zhou H., Li W., Li W.-P., Sun N., Yang R.: *Interactive effect of cerium and aluminum on the ignition point and the oxidation resistance of magnesium alloy*. „Corrosion Science” 50/2008, s. 2669–2675.
43. Liu M., Shih D.S., Parish C., Atrens A.: *The ignition temperature of Mg alloys WE43, AZ31 and AZ91*. „Corrosion Science” 54/2012, s. 139–142.
44. Lucci R., López P.R., Nicola P., Meneses M., Oldani C.: *Possibilities of recovering AZ91 magnesium alloy from machining shavings contaminated with oil, through their fusion with argon gas protection*. „Procedia Materials Science” 1/2012, s. 44-49.

45. Matuszak J., Zaleski K., *Badania chropowatości powierzchni i mikrotwardości warstwy wierzchniej wybranych stopów aluminium i magnezu po obróbce frezowaniem*, in *Obróbka Skrawaniem, Współczesne problemy. Monografia IV Szkoły Obróbki Skrawaniem*, Redakcja: Kruszyński B., Łódź 2010, s. 349-356.
46. Miernik M.: *Skrawalność metali. Metody określania i prognozowania*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław, 2000.
47. Miernikiewicz A., Przybylski L.: *Temperatura skrawania, Część II. Temperatura wióra. Badania doświadczalne*. „Archiwum Technologii Maszyn i Automatyacji” 24/2004.
48. 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.
49. O’Sullivan D., Cotterell M.: *Temperature measurement in single point turning*. „Journal of Materials Processing Technology” 118/2001, s. 301-308.
50. Obermair F., *High Speed Minimum Quantity Lubrication Machining of Magnesium*, in *Magnesium Proceedings of the 6th International Conference Magnesium Alloys and Their Applications*, Editor: Kainer K.U., Weinheim 2003.
51. Oczó K.E.: *Doskonalenie procesów kształtowania ubytkowego stopów aluminium cz.I*. „Mechanik” 3/2009.
52. Oczó K.E.: *Efektywne skrawanie stopów magnezu*. „Mechanik” 7/2000, s. 467-474.
53. Oczó K.E.: *Obróbka wysokowydajna-HPC (High Performance Cutting)*. „Mechanik” 11/2004, s. 701-709.
54. Oczó K.E.: *Rozszerzenie granic stosowalności stopów magnezu*. „Mechanik” 5-6/2009, s. 386-400.
55. Oczó K.E., Kawalec A.: *Kształtowanie metali lekkich*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa, 2012.
56. Oerlikon: *Balzars Coating: Diamantschicht für die Aluminiumbearbeitung*. 2008;
57. Orman M., Orman Z.: *Technologia magnezu i jego stopów*. Wydawnictwo Śląsk. Katowice, 1965.
58. Piekarski R.: *Obróbka szybkościowa stopów aluminium (MITSUBISHI MATERIALS)*. „Mechanik” 3/2008, s. 184.
59. 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.
60. Pieśko P., Zagórski I.: *Analiza porównawcza metod frezowania HSM, HPC oraz frezowania konwencjonalnego wysokokrzemowych stopów aluminium*. „Postępy Nauki i Technik” 7/2011, s. 219-226.
61. 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.

62. Ravi Kumar N.V., Blandin J.J., Suery M., Grosjean E.: *Effect of alloying elements on the ignition resistance of magnesium alloys*. „Scripta Materialia” 49/2003, s. 225-230.
63. 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*. „Mechanics” 18(10)/2008, s. 627-633.
64. Sandvik: *Poradnik obróbki skrawaniem*. Sandvik. Szwecja, 2007.
65. 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.
66. Sprus M.: *Narzędzia do obróbki materiałów konstrukcyjnych o zredukowanej masie, Cz. I* „Mechanik” 11/2007, s. 926-929.
67. Sprus M.: *Standardowe narzędzia diamentowe PKD*. „Mechanik” 2/2007, s. 96-98.
68. Sreejith P.S.: *Machining of 6061 aluminium alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions*. „Materials Letters” 62(2)/2008, s. 276-278.
69. Storch B.: *Podstawy obróbki skrawaniem*. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Koszalińskiej. Koszalin, 2001.
70. *Machining magnesium*. http://www.nanomag.us/Hydro_Mg_Brochure_Machining_Mg.pdf.
71. *Machining of magnesium*. <http://www.magnesium-elektron.com>.
72. *Magnesium alloys encyclopedia*. <http://www.magnesium.com>.
73. *Magnez – materiał o rewelacyjnych właściwościach*. <http://www.ntp.com.pl/>.
74. Tomac N., Tonnessen K., Mikac T.: *Study of Influence of Aluminium Content on Machinability of Magnesium Alloys*. „Strojarstvo” 50/2008, s. 363-367.
75. Tönshoff H.K., Winkler J.: *The influence of tool coatings in machining of magnesium*. „Surface and Coatings Technology” 94-95/1997, s. 610-616.
76. Weinert K., Inasaki I., Sutherland J.W., Wakabayashi T.: *Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication*. „CIRP Annals – Manufacturing Technology” 53/2004, s. 511-537.
77. *How To Machine Magnesium?* <http://www.suwaprecision.com/>.
78. Zagórski I., *Analiza celowości stosowania różnych metod pomiaru temperatury podczas skrawania stopów Mg*, in *Raport z badań w ramach projektu POIG. 01.01.02-00-015/08-002010*: Lublin.
79. Zagórski I., *Znaczenie temperatury w strefie skrawania w aspekcie bezpiecznej obróbki stopów Mg*, in *Raport z badań w ramach projektu POIG. 01.01.02-00-015/08-002010*.
80. Zagórski I., Kuczmaszewski J.: *Badania mikrotwardości stopów magnezu po szybkościowym frezowaniu na sucho*. „Mechanik” 8-9/2013, s. 720-724.
81. Zagórski I., Kuczmaszewski J., *Badania porównawcze skrawalności stopów magnezu AZ 91 HP i AZ 31*, in *Obróbka Skrawaniem, Współczesne problemy. Monografia IV Szkoły Obróbki Skrawaniem*, Redakcja: Kruszyński B., Łódź 2010, s. 137-144.

82. Zagórski I., Kuczmaszewski J.: *Badania sił skrawania i ich amplitud podczas frezowania stopów magnezu w warunkach obróbki szybkościowej na sucho.* „PNiT” /2013.
83. Zagórski I., Kuczmaszewski J., *Metody pomiaru temperatury podczas frezowania stopów magnezu*, in *14th International Scientific Conference „Automation in Production Planning and Manufacturing“*, Zilina – Turcianske Teplice 2011.
84. Zagórski I., Kuczmaszewski J.: *Selected problems of effectiveness of processing of magnesium alloys with a Kordell design tool.* „Mper” 4/2011, s. 90-96.
85. Zagórski I., Pieško P., *Badania porównawcze chropowatości powierzchni wybranych stopów magnezu po frezowaniu narzędziem pełnowęglkowym oraz PKD*, in *IV Międzynarodowe Sympozjum Naukowe, Postęp w technikach wytwarzania i konstrukcji maszyn*, Redakcja: G. Borowski, Lublin 2011, s. 53-58.
86. Zagórski I., Pieško P., *Wpływ parametrów technologicznych na wartość wybranych wskaźników skrawalności lotniczych stopów Al oraz Mg*, in *X Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Technologiczne Systemy Informacyjne w Inżynierii Produkcji i Kształceniu Technicznym, Monografia „Innowacyjne Procesy Technologiczne”*, Redakcja: Świć A., Lublin 2011, s. 19-32.
87. Zaleski K.: *Laboratorium obróbki ubytkowej.* Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej. Lublin, 2001.
88. Zalewski A.: *Efektywne wytwarzanie dzięki optymalnej strategii obróbki HSM.* „Projektowanie i konstrukcje inżynierskie” 3.grudzień.2007, s. 23-26.
89. Zgórniak P., Grduńska A., Zagórski I., *Sprawozdanie z badań procesu skrawania stopów magnezu*, in *Raport z badań w ramach projektu POIG. 01.01.02-00-015/08-002012.*
90. Zhao N., Hou J., Zhu S., *Chip ignition in research on high-speed face milling AM50A magnesium alloy*, in *Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering.* Inner Mongolia, China 2011.
91. Zhou H., Li W., Wang M., Zhao Y.: *Study of ignition proof AZ91D magnesium alloy chips with cerium addition.* „Journal of Rare Earth” 23/2005, s. 466-469.

4. Modelowanie matematyczne procesu skrawania

Skrawanie jest wciąż jednym z najpopularniejszych sposobów wytwarzania elementów maszyn i dlatego znajomość zjawisk w nim przebiegających jest kluczowym zagadnieniem, z którym borykają się naukowcy i inżynierowie. Przy obecnym wysokim poziomie rozwoju metod numerycznych szczególnego znaczenia nabiera modelowanie procesu skrawania, którego pierwszym etapem jest budowa modelu matematycznego a następnie numerycznego. Właściwie zdefiniowany model matematyczny procesu skrawania pozwala wyjaśnić podstawowe aspekty, takie jak ścinanie materiału, tarcie stykających się powierzchni i drgania generowane przez proces. Właśnie drgania są główną przyczyną niestabilności skrawania i dlatego zostaną one omówione w kolejnych podrozdziałach.

4.1. Rodzaje drgań w procesie skrawania

Obrabiarka wraz z uchwytem, narzędziem i przedmiotem obrabianym tworzy przestrzenny układ (OUPN), mający złożoną charakterystykę dynamiczną. W układzie OUPN występują często drgania elementów składowych, wywołane oddziaływaniami siłowymi i kinematycznymi. Dynamiczny układ OUPN składa się z podukładu masowo-dyssypacyjno-sprężystego i procesu obróbczego, na który działają różnego rodzaju sygnały wymuszające, sterujące i zakłócające, jak podaje Grzesik [2]. Ze względu na źródło wymuszenia drgania podczas skrawania dzieli się na:

- własne (swobodne),
- wymuszone kinematycznie lub siłowo,
- samowzbudne.

Opis drgań tego typu można przedstawić za pomocą układu drgającego o jednym stopniu swobody, w którym prawa strona równania odpowiada za wymuszenie:

$$\begin{array}{l} 0 \quad \text{drgania swobodne} \\ m\ddot{x}(t) + kx(t) + c\dot{x}(t) = F(t) \quad \text{drgania wymuszone} \\ f[x(t)] \quad \text{drgania samowzbudne} \end{array} \quad (4.1)$$

W równaniu m oznacza masę układu drgającego (OUPN), c – współczynnik tłumienia, k – sztywność.

Drgania swobodne występują wtedy, gdy na układ nie działa żadna siła a stan równowagi został naruszony przez impuls lub zmianę warunków ruchu urządzenia, co matematycznie wyraża się odpowiednimi warunkami początkowymi. Drgania tego typu mają charakter przejściowy i zostają wy tłumione po pewnym czasie wskutek braku wymuszenia.

Drgania wymuszone powstają wówczas, gdy na układ działa zmienna w czasie siła wymuszająca, najczęściej okresowa lub poli-okresowa, pochodząca np. od niewyważenia elementów wirujących, przerywanego charakteru pracy ostrza czy drgań przenoszonych z innych urządzeń.

Drgania samowzbudne natomiast występują przy braku wymuszenia o charakterze okresowym. Dopływ energii wywołujący i podtrzymujący ruch drgający regulowany jest przez sam układ. W obróbce skrawaniem układ OUPN uważa się za stabilny, gdy nie występują w nim drgania wywołane przejściowym wymuszeniem. Głównymi przyczynami wystąpienia drgań samowzbudnych podczas skrawania są:

- Sprężenie wewnętrzne w układzie masowo-sprężysto-tłumiącym OUPN, także pomiędzy parametrami ruchów roboczych.
- Sprężenie przez obróbkę po śladzie (efekt regeneracyjny, regeneracja śladu). Regeneracja śladu może wystąpić, gdy wskutek drgań układu, najczęściej w kierunku posuwu, następuje zmiana w czasie grubości warstwy skrawanej. Powstająca w ten sposób fala na powierzchni obrabianej generuje drgania. Z uwagi na fakt, że parametry tej fali są zależne od przemieszczeń i odkształceń elementów układu OUPN w poprzednim obrocie, sprężenie zwrotne występuje z opóźnieniem równym czasowi jednego obrotu przedmiotu obrabianego podczas toczenia lub odpowiadającym czasowi przejścia poprzedniego ostrza w obróbce narzędziami wieloostrzowymi.
- Zjawisko tarcia pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym i wiórem.

Z uwagi na złożoność problemu drgań samowzbudnych w procesie skrawania ich dokładniejsza analiza teoretyczna i doświadczalna przedstawiona została w dalszej części pracy.

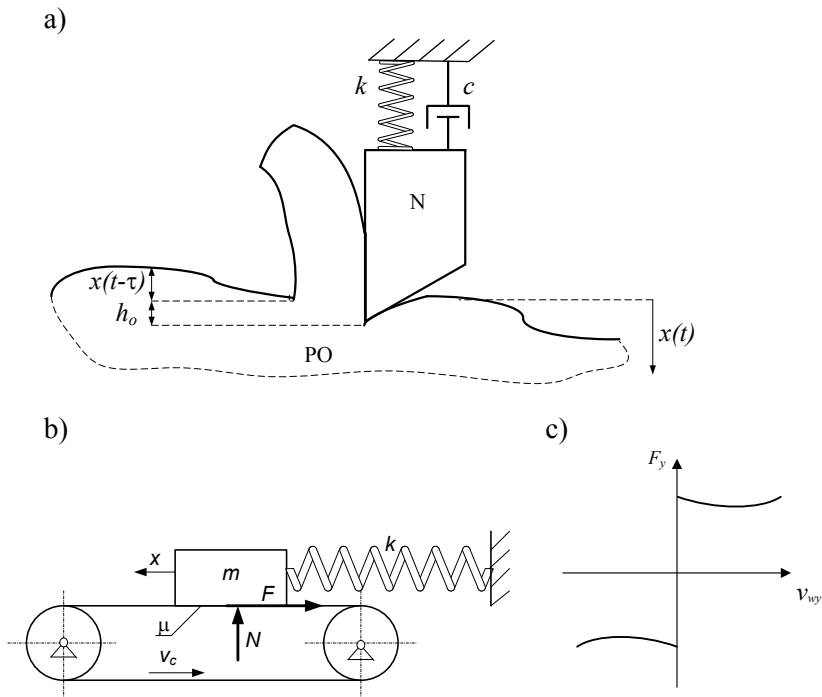
4.2. Przyczyny drgań samowzbudnych

Podstawową cechą drgań samowzbudnych jest mechanizm ich powstawania, polegający na tym, że energia dostarczana do układu drgającego jest generowana przez tenże układ. W tym przypadku źródła energii mają charakter nieokresowy, a układ sam reguluje dopływ tej energii. Jeśli z jakichkolwiek powodów drgania ustaną, zniknie również siła je wywołująca i podtrzymująca. Taki mechanizm powstawania drgań obserwowany jest w instrumentach dętych i smyczkowych,

a także w zegarach. Taki mechanizm, wywołujący sprzężenie zwrotne między drganiami układu masowo – sprężysto – tłumiącego a siłą działającą na ten układ, występuje również w obróbce skrawaniem. Drgania samowzbudne generowane podczas skrawania zwane są jako „chatter”. Ze względu na przyczynę powstawania (choć zawsze jest to mechanizm regulujący przepływem energii przez układ) drgań w obróbce skrawaniem wyróżnia się [7, 8]:

- chatter regeneracyjny,
- chatter tarciowy,
- chatter sprzężenia postaci („mode coupling”),
- chatter termomechaniczny.

Z uwagi na specyfikę obróbki ubytkowej chatter regeneracyjny i tarciowy odgrywają najistotniejszą rolę w procesie generowania drgań i dlatego będą one wyjaśnione dokładniej w tym opracowaniu.



Rys. 4.1. Model drgań samowzbudnych

Chatter regeneracyjny, czyli regeneracja drgań przez przemieszczenie, wywołany jest przez sprzężenie zwrotne między drganiami układu masowo-sprężysto-tłumiącego (UMST), jakim jest układ obrabiarka – uchwyt – przedmiot – narzędzie (OUPN), a siłą skrawania (rys. 4.1a). Przemieszczenia narzędzia (x) względem

przedmiotu obrabianego powodują zmiany grubości przekroju warstwy skrawanej (WS), a to pociąga za sobą zmiany siły skrawania. Zmiany sił skrawania, z kolei, powodują drgania narzędzia względem przedmiotu obrabianego. Szczegółowy opis tego zjawiska znaleźć można w pracach [4-6], gdzie wyjaśniono powstawanie zewnętrznej i wewnętrznej modulacji grubości warstwy skrawanej. Mechanizm ten jest typowym mechanizmem samowzbudnym, w którym siła „podtrzymująca” drgania wynika z różnicy faz między modulacją zewnętrzną a wewnętrzną. Przesunięcie w czasie, powodujące różnicę faz, jest określane jako odstęp czasowy między przejściami kolejnych ostrzy narzędzia w przypadku frezowania lub czasem jednego obrotu przedmiotu obrabianego (PO) w przypadku obróbki tokarskiej.

Chatter tarciový, traktowany marginalnie przez niektórych badaczy związany jest z nieliniową (opadającą) charakterystyką tarcia, która generuje zmienną siłę w zależności od prędkości względnej stykających się elementów. W przypadku skrawania chodzi tu o tarcie występujące pomiędzy narzędziem a wiórem na powierzchni natarcia i pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym (PO) na powierzchni przyłożenia. Mechanizmem pokazującym istotę zjawiska tarcia, które wywołuje drgania samowzbudne jest układ pokazany na rys. 4.1b. Istotna jest tutaj nieliniowa charakterystyka siły tarcia F_y w funkcji prędkości względnej v_{wy} , pokazana na rys. 4.1c.

Chatter tarciový zależy od właściwości materiału obrabianego, ma istotne znaczenie szczególnie w obróbce skrawaniem tworzyw polimerowych.

4.3. Modele procesu skrawania

Obróbka skrawaniem jest procesem bardzo złożonym. Będąc najczęściej przedmiotem badań czynniki wyjściowe tego procesu, takie jak dokładność, struktura geometryczna i stan warstwy wierzchniej obrabianych przedmiotów, wydajność i energochłonność obróbki, trwałość ostrza narzędzi, zależą od kilkadziesiątu czynników wejściowych. W przypadku tak złożonych procesów trudne jest wyznaczenie dokładnych zależności między czynnikami wejściowymi, opisującymi warunki technologiczne skrawania, a czynnikami wyjściowymi na drodze teoretycznej. Zależności te można uzyskać na drodze modelowania tego procesu. Budowane modele są uproszczeniem rzeczywistego procesu obróbki, ale powinny wyrażać najważniejsze jego cechy.

Stosowane w obróbce skrawaniem modele można podzielić na analityczne, doświadczalne, mechanistyczne i numeryczne. Do modelowania procesów obróbki skrawaniem wykorzystywane są nowoczesne techniki, takie jak sztuczne sieci neuronowe, logika rozmyta, metoda elementów skończonych, metoda różnic skończonych, metoda elementów brzegowych [2, 4].

Modele procesu skrawania, przedstawiane w literaturze, dotyczą najczęściej skrawania ortogonalnego (poprzecznego). Jest to przypadek skrawania jedną, prostoliniową krawędzią skrawającą, dłuższą od szerokości warstwy skrawanej, a szerokość warstwy skrawanej jest znacznie większa od grubości warstwy skrawanej. Wektor prędkości ruchu głównego jest prostopadły do krawędzi skrawającej. Dużo bardziej ogólny i znacznie częściej stosowany w praktyce jest przypadek skrawania nieortogonalnego. W niniejszym opracowaniu skupiono się na procesie frezowania z uwagi na dużą popularność tego sposobu obróbki w przemyśle lotniczym.

Powszechnie wiadomo, że siły skrawania są następstwem ścinania części materiału przedmiotu obrabianego (PO) oraz tarcia narzędzia o wiór i materiał obrabiany. Jednak zjawisko tarcia jest zazwyczaj traktowane marginalnie i pomijane w modelowaniu procesu skrawania. Dlatego w tym miejscu połączono główny efekt ścinania materiału i dodano zjawisko tarcia, które wprawdzie ma znacznie mniejszy udział w tworzeniu całkowitej siły skrawania, ale z uwagi na swój nieliniowy charakter może być źródłem dodatkowych niestabilności. W literaturze przedmiotu nie napotkano prac traktujących jednocześnie zjawisko tarcia i regeneracji drgań, dlatego tutaj zaproponowano model procesu skrawania, który uwzględnia oba te efekty jednocześnie.

Efekt regeneracji drgań powoduje zmianę grubości warstwy skrawanej i dlatego wprowadzono pojęcie chwilowej grubości warstwy skrawanej (CGWS), która w warunkach występowania drgań narzędzia względem przedmiotu obrabianego opisana jest zależnością:

$$h = h_o - x(t) + x(t - \tau) \quad (4.2)$$

gdzie: h_o – nominalna wartość grubości warstwy skrawanej, $x(t)$ – aktualne przemieszczenie narzędzia względem przedmiotu obrabianego, $x(t - \tau)$ – przemieszczenie narzędzia w poprzednim przejściu (toczenie) lub przy przejściu poprzedniego ostrza (frezowanie), τ – czas między kolejnymi przejściami ostrza lub przejściami kolejnych ostrzy (pomniejszony o czas potrzebny na pokonanie odcinka równego rzutowi długości strefy ścinania na kierunku prędkości skrawania, ale ten czas, jako bardzo krótki, można pominąć w naszych rozważaniach).

Proces budowy modeli skrawania ortogonalnego i nieortogonalnego na przykładzie frezowania opisano w następnych podrozdziałach.

4.4. Model skrawania ortogonalnego

Schematycznie skrawanie ortogonalne przedstawiono na rysunku 4.1a, gdzie układ OUPN reprezentowany jest przez narzędzie N i przedmiot obrabiany PO. Narzędzie posiada właściwości masowo-sprężysto-tłumiące opisane masą (m), sztywnością (k) i tłumieniem (c). Jest to model układu drgającego o jednym stop-

niu swobody, w którym składowa siła skrawania w kierunku x może być wyrażona zależnością:

$$F_x = K_x b h^\kappa \quad (4.3)$$

gdzie: K_x reprezentuje opór skrawania, b jest szerokością warstwy skrawanej, h – grubością warstwy skrawanej zaś κ – stałym wykładnikiem charakterystycznym dla danego materiału. Wówczas, równanie ruchu narzędzia przedstawia zależność:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = K_x b (h_o - x(t) + x(t - \tau))^\kappa + K_{xT} (c + \text{sgn}(v_r) - av_r + bv_r^3) \quad (4.4)$$

Wyrażenie $K_{xT} (c + \text{sgn}(v_r) - av_r + bv_r^3)$ reprezentuje siłę tarcia narzędzia o wiór, zaś v_r jest prędkością względną przesuwania się wióra po narzędziu, która w przybliżeniu może być zdefiniowana jak poniżej:

$$v_r(t) = v_c - \dot{x}(t) \quad (4.5)$$

gdzie: a , b , c są stałymi definiującymi kształt charakterystyki tarcia (rys. 4.1c), zaś v_c jest prędkością skrawania.

W aspekcie dynamiki procesu stałe c i h_o nie mają wpływu na zachowanie dynamiczne układu, a jedynie wywołują statyczne przesunięcie środka drgań. W takim przypadku możliwa jest konwersja równania do postaci:

$$\ddot{x}(t) + \delta\dot{x}(t) + \omega_o^2 x(t) = \alpha(-x(t) + x(t - \tau)) + \mu(\text{sgn}(v_r) - av_r + bv_r^3) \quad (4.6)$$

gdzie,

$$\delta = \frac{c}{m}, \quad \omega_o = \frac{k}{m}, \quad \alpha = \frac{K_x b}{m}, \quad \mu = \frac{K_{xT}}{m} \quad (4.7)$$

Równanie może być użyte do analizy skrawania ortogonalnego z uwzględnieniem obu efektów: regeneracyjnego i tarcowego. Istotnym elementem są parametry tego modelu, które będą identyfikowane w dalszej części pracy.

4.5. Model frezowania

Specyfika procesu frezowania jest nieco inna z uwagi na fakt stosowania narzędzi wieloostrowych. W procesie frezowania, materiał jest usuwany z przedmiotu obrabianego przez narzędzie obracające się z dużą prędkością, zwłaszcza w obróbce HSM. Stosowanie wieloostrowych narzędzi dodatkowo wprowadza

nieciągłości i inicjuje zjawiska dynamiczne zachodzące podczas tego rodzaju obróbki. Efekt regeneracji (odwzorowania) drgań polega w tym przypadku na tym, że ślad pozostawiony przez jedno z ostrzy narzędzia modyfikuje grubość warstwy skrawanej przez kolejne ostrze. Ta zmiana grubości warstwy skrawanej implikuje niepożądane drgania podczas obróbki. Kluczowym parametrem jest wówczas opóźnienie czasowe, czyli czas pomiędzy kolejnymi przejściami ostrzy:

$$\tau = \frac{60}{z n} = \frac{2\pi}{z \Omega} \quad (4.8)$$

zależne od prędkości obrotowej narzędzia n (prędkości kątowej Ω) i liczby ostrzy z . Opóźnienie τ jest to czas, w którym narzędzie obróci się o kąt odpowiadający odległości między kolejnymi ostrzami narzędzia. Założona grubość warstwy skrawanej w warunkach statycznych może być wyrażona wzorem znanym w [3]:

$$h_{j0} = f_z \sin \varphi_j \quad (4.9)$$

gdzie: f_z oznacza posuw na ostrze, zaś φ_j określa położenie kątowe j -tego ostrza. Wówczas siłę obciążającą pojedyncze j -te ostrze można rozłożyć na dwie składowe w układzie współrzędnych τ - n związanym z narzędziem (rys. 4.2) i przedstawić równaniami:

$$\begin{aligned} F_{sj} &= K_s a_p h_{j0}^\kappa \\ F_{nj} &= K_n a_p h_{j0}^\kappa \end{aligned} \quad (4.10)$$

w których K_s i K_n oznaczają siły jednostkowe w kierunkach τ oraz n , zaś κ jest stałym wykładnikiem charakterystycznym dla wybranego procesu. Jest to podejście klasyczne, które nie uwzględnia efektów tarciovych zależnych od prędkości względnej narzędzia i przedmiotu obrabianego. Aby uwzględnić zjawisko tarcia w naszym modelu równania zmodyfikowano do postaci:

$$\begin{aligned} F_{sj} &= K_s a_p h_{j0}^\kappa + K_{sT} (c + \operatorname{sgn}(v_r) - av_r + bv_r^3) \\ F_{nj} &= K_n a_p h_{j0}^\kappa + K_{nT} (c + \operatorname{sgn}(v_r) - av_r + bv_r^3) \end{aligned} \quad (4.11)$$

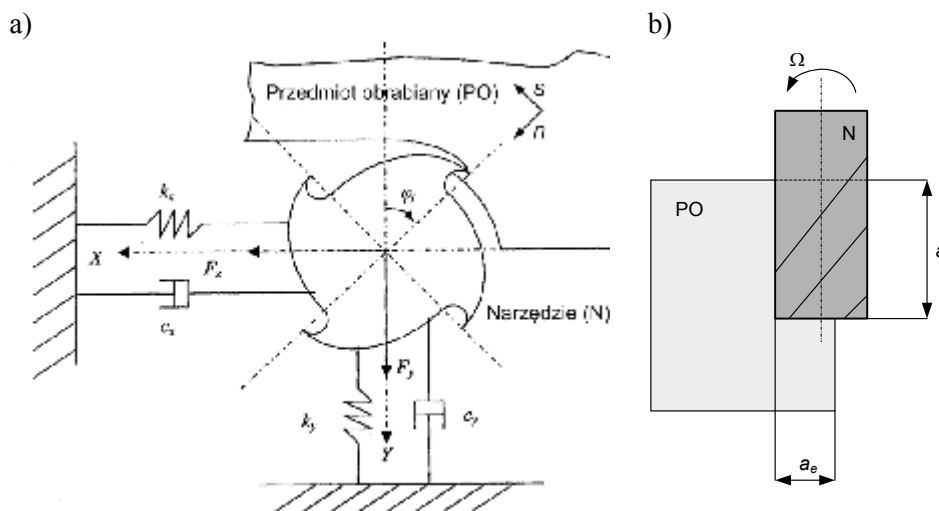
gdzie: K_{sT} i K_{nT} są współczynnikami wpływu tarcia w kierunkach s i n , natomiast a , b , c są stałymi definiującymi kształt charakterystyki tarcia zgodnie z opisem z poprzedniej sekcji. W warunkach rzeczywistych grubość warstwy skrawanej nie jest stała (równa wartości statycznej – h_{j0}), ale zależy od różnicy drgań w kierunku x i y aktualnie analizowanego j -tego ostrza w położeniu określonym przez φ_j i czas t , jak i poprzedniego ($j-1$) ostrza w czasie $(t-\tau)$. Wtedy, aktualna grubość warstwy skrawanej może być przedstawiona następującym równaniem:

$$h_j = f_z \sin \varphi_j + (x(t) - x(t - \tau)) \sin \varphi_j + (y(t) - y(t - \tau)) \cos \varphi_j \quad (4.12)$$

W celu uogólnienia rozważań dla dowolnego (j -tego) ostrza należy przyjąć, że jego położenie kątowe wyraża zależność:

$$\varphi_j = \Omega t + j\nu; \quad j = 0, 1, \dots, z - 1 \quad (4.13)$$

gdzie: $\nu = \frac{2\pi}{z}$ jest kątem między sąsiednimi ostrzami.

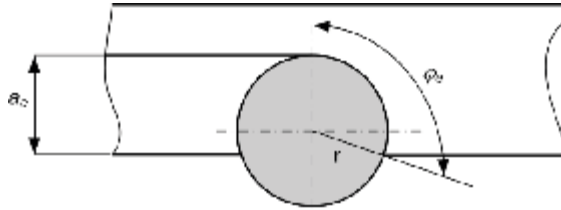


Rys. 4.2. Model procesu frezowania walcowo-czołowego

Założenia do takiego modelu znane są w literaturze i zostały szczegółowo przedstawione w pracy [1]. Jednak kluczowym problemem wydaje się być odpowiednie zdefiniowanie czasu i liczby ostrzy, które jednocześnie biorą udział w skrawaniu. Stąd też w niniejszym opracowaniu zaproponowano zdefiniowanie funkcji jednostkowej g_j , która określi czy dane ostrze uczestniczy we frezowaniu czy też nie i przyjmie odpowiednio wartości 1 i 0. W tym celu określono kąt wejścia i wyjścia ostrza z materiału jako Φ_s i Φ_e (rys. 4.3) i na tej podstawie określono funkcję:

$$g_j = \begin{cases} 1, & \varphi_s \leq \varphi_j \leq \varphi_e \\ 0, & \varphi_e < \varphi_j < \pi \end{cases} \quad (4.14)$$

Kąt wejścia w materiał $\Phi_s=0$ w analizowanym przypadku frezowania przeciwbieżnego, dlatego nie jest on widoczny na rys.4.3.



Rys. 4.3. Schemat frezowania czołowego

Kąt wyjścia ostrza z materiału obrabianego zdefiniowano:

$$a_e = r - r \cos \varphi_e \rightarrow \cos \varphi_e = \frac{r - a_e}{r} \quad (4.15)$$

Wówczas warunek, aby ostrze pozostawało w materiale, można sprowadzić do postaci:

$$\sin \varphi_j > 0 \quad i \quad \cos \varphi_j \geq \cos \varphi_e \quad (4.16)$$

stąd:

$$\sin \varphi_j > 0 \quad i \quad \cos \varphi_j - \cos \varphi_e \geq 0 \quad (4.17)$$

Po uwzględnieniu równania w warunku otrzymano:

$$g_j = H(\sin \varphi_j) \cdot H(\cos \varphi_j - \cos \varphi_e) = \begin{cases} 1, & \varphi_s \leq \varphi_j \leq \varphi_e \\ 0, & \varphi_e < \varphi_j < \pi \end{cases} \quad (4.18)$$

Wówczas siły działające na j -ostrze wyraża się zależnością:

$$\begin{aligned} F_{sj} &= K_s a_p (f_z \sin \varphi_j + (x(t) - x(t - \tau)) \sin \varphi_j \\ &+ (y(t) - y(t - \tau)) \cos \varphi_j)^k g_j + K_{sT} (c + \operatorname{sgn}(v_r) - av_r + bv_r^3) g_j \\ F_{nj} &= K_n a_p (f_z \sin \varphi_j + (x(t) - x(t - \tau)) \sin \varphi_j + \\ &+ (y(t) - y(t - \tau)) \cos \varphi_j)^k g_j + K_{nT} (c + \operatorname{sgn}(v_r) - av_r + bv_r^3) g_j \end{aligned} \quad (4.19)$$

zaś siły pochodzące od wszystkich ostrzy uczestniczących w skrawaniu określają równania:

$$F_s = \sum_{j=1}^z F_{sj}$$

$$F_n = \sum_{j=1}^z F_{nj}$$
(4.20)

Model dynamiczny zakłada, że narzędzie (N) o sztywności k_x i k_y oraz współczynnikach tłumienia c_x i c_y , odpowiednio w kierunku x i y , obraca się z prędkością kątową Ω , przesuwa zgodnie z posuwem na ostrze f_z i może wykonywać ruch drgający względem przedmiotu obrabianego (PO). Ponieważ równania ruchu narzędzia będą napisane dla kierunków x i y , niezbędne jest rzutowanie sił F_s i F_n na te kierunki, wówczas otrzymano:

$$F_{xj} = F_{nj} \sin \varphi_j + F_{sj} \cos \varphi_j$$

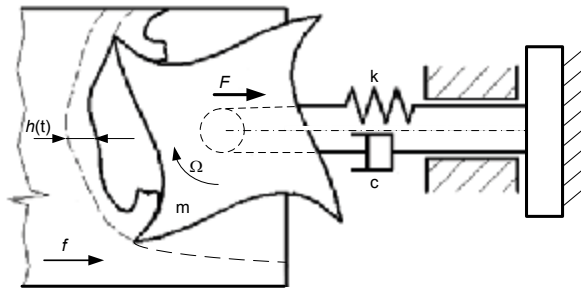
$$F_{yj} = F_{nj} \cos \varphi_j - F_{sj} \sin \varphi_j$$
(4.21)

Równanie różniczkowe ruchu, które w zasadzie jest równaniem różniczkowym z opóźnionym argumentem (z opóźnieniem czasowym) przybiera postać:

$$m\ddot{x} + c_x \dot{x} + k_x x = F_x$$

$$m\ddot{y} + c_y \dot{y} + k_y y = F_y$$
(4.22)

Uproszczeniem takiego modelu o dwóch stopniach swobody jest model jednowymiarowy (1dof). Model taki otrzymano odbierając możliwość ruchu narzędzia w kierunku y . Model uproszczony przedstawiono na rys. 4.4.



Rys. 4.4. Model frezowania o jednym stopniu swobody

Wprowadzając nowe oznaczenia $F_x=F$, $k_x=k$, $c_x=c$, siłę działającą na narzędzie przedstawimy:

$$\begin{aligned}
F = K_n a_p \sum_{j=1}^z (f_z \sin \varphi_j + (x(t) - x(t - \tau)) \sin \varphi_j)^k g_j \sin \varphi_j + \\
K_s a_p \sum_{j=1}^z (f_z \sin \varphi_j + (x(t) - x(t - \tau)) \sin \varphi_j)^k g_j \cos \varphi_j
\end{aligned}
\tag{4.23}$$

Jest to końcowa postać zależności opisującej siłę skrawania w modelu o jednym stopniu swobody.

Literatura

1. Faassen R.P.H., van de Wouw N., Oosterling J.A.J., and Nijmeijer H., *Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-speed milling*, Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, 2003, pp. 1437-1446.
2. Grzesik, W., *Podstawy Skrawania Materiałów Metalowych*, WNT, Warszawa, 1998.
3. Insperger, T., Stepan, G., Bayly, P. V., and Mann, B. P., *Multiple chatter frequencies in milling processes*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 262, No. 2, 2003, pp. 333-345.
4. Jemielniak, K., *Analityczno-doświadczalny model dynamicznej charakterystyki procesu skrawania przy toczeniu nieswobodnym*, Politechnika Warszawska Prace Naukowe, Mechanika, No. 12, 1990.
5. Jemielniak, K., *Modeling of dynamic cutting coefficients in three-dimensional cutting*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 32, No. 4, 1992, pp. 509-519.
6. Jemielniak, K. and Widota, A., *Numerical-Simulation of Non-Linear Chatter Vibration in Turning*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 29, No. 2, 1989, pp. 239-247.
7. Wiercigroch, M. and Budak, E., *Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting*, Phil.Trans.The Royal Society of London A Mathematical Physical And Engineering Sciences, Vol. 359, No. 1781, 2001, pp. 663-693.
8. Wiercigroch, M. and Krivtsov, A. M., *Frictional Chatter in Orthogonal Metal Cutting*, Phil.Trans.The Royal Society Society of London A Mathematical Physical And Engineering Science, Vol. 359, 2001, pp. 713-738.

5. Dynamika skrawania stopów aluminium i magnezu w warunkach konwencjonalnych i HSM

5.1. Skrawanie konwencjonalne a HSM

Jednym z trendów rozwoju ubytkowego kształtowania przedmiotów jest zwiększanie prędkości skrawania. Bardzo duży wzrost prędkości skrawania nastąpił w końcowych latach XX wieku, co związane było z wprowadzeniem nowych materiałów narzędziowych oraz pokrywaniem narzędzi powłokami przeciwzużyciowymi. Przyjęło się oznaczanie skrawania z dużymi prędkościami, również w języku polskim, akronimem HSM (High Speed Machining), natomiast obróbka z mniejszymi prędkościami skrawania określana jest jako skrawanie konwencjonalne.

Z analizy literatury wynika, że nie ma jednoznacznej definicji obróbki HSM, a podział na technologię konwencjonalną i HSM ma charakter umowny. Zgodnie z potoczną opinią można przyjąć, że prędkości skrawania stosowane podczas obróbki HSM są 5-10 razy większe od prędkości skrawania konwencjonalnego, przy czym relacje te zależą od rodzaju obrabianego materiału [4, 5]. Zgodnie z normami europejskimi, dla narzędzi o średnicy do 32 mm, jako HSM traktowana jest obróbka z prędkością skrawania przekraczającą 1000 m/min [2]. HSM określane jest też jako obróbka z prędkością obrotową wrzeciona przekraczającą 8000 obr/min. Jednak bardziej właściwym wydaje się pogląd, aby jako kryterium HSM przyjmować iloczyn średnicy wrzeciona i jego prędkości obrotowej [7]. Do definiowania obróbki HSM wykorzystywane są różne wielkości charakteryzujące proces skrawania. Do wielkości tych można zaliczyć siły skrawania, siłę tarcia w strefie skrawania, energię właściwą skrawania, stosunek zapotrzebowania mocy silnika wrzeciona do jego maksymalnej prędkości obrotowej [2, 3].

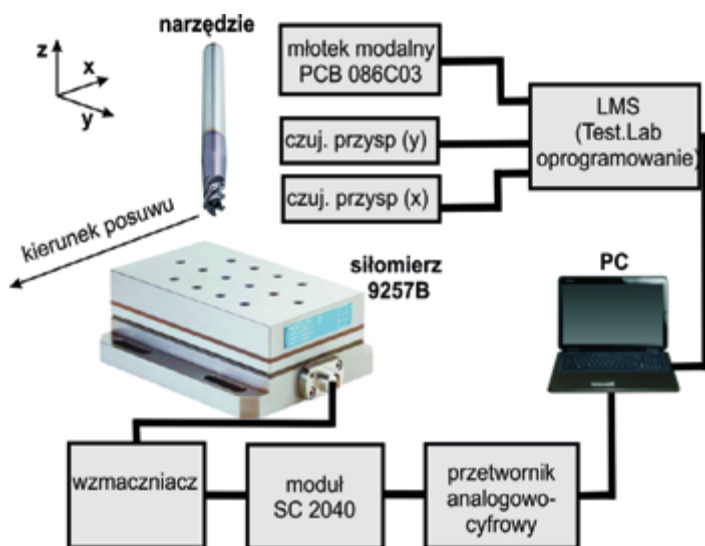
Rosnące zainteresowanie obróbką HSM, zwłaszcza przemysłu lotniczego, wiąże się z szeregiem korzyści uzyskiwanych po wdrożeniu skrawania z dużymi prędkościami. Efektem wzrostu prędkości obrotowej jest zmniejszenie czasu maszynowego, a tym samym zwiększenie wydajności obróbki. Ponadto do korzystnych skutków wprowadzenia HSM można zaliczyć zmniejszenie sił skrawania, zmniejszenie procentowego udziału ciepła skrawania przenikającego do

obrabianego przedmiotu, zmniejszenie chropowatości obrabianej powierzchni, większe możliwości obróbki elementów cienkościennych, korzystniejszą postać wiórów [1, 6].

Jakość obrabianych przedmiotów, trwałość ostrza, a także zużycie maszyn technologicznych w bardzo dużym stopniu zależy od stabilności obróbki. Wyniki analizy stabilności dynamicznej skrawania stopów aluminium i magnezu w warunkach konwencjonalnych i HSM przedstawiono w kolejnych podrozdziałach.

5.2. Badania doświadczalne

Doświadczalne próby frezowania przeprowadzono na pionowym centrum obróbkowym AVIA, gdzie rejestrowano trzy składowe siły skrawania, t.j. siłę F_x , F_y oraz F_z , używając stanowiska pomiarowego przedstawionego na rys. 5.1. Układ pomiarowy składał się z siłomierza piezoelektrycznego (Kistler 9257B), wzmacniacza ładunku (Kistler 5017B), modułu NI SC2040 służącego do równoległego próbkowania sygnałów pomiarowych, przetwornika analogowo – cyfrowego (NI 6071E) oraz komputera klasy PC z oprogramowaniem TestLab.



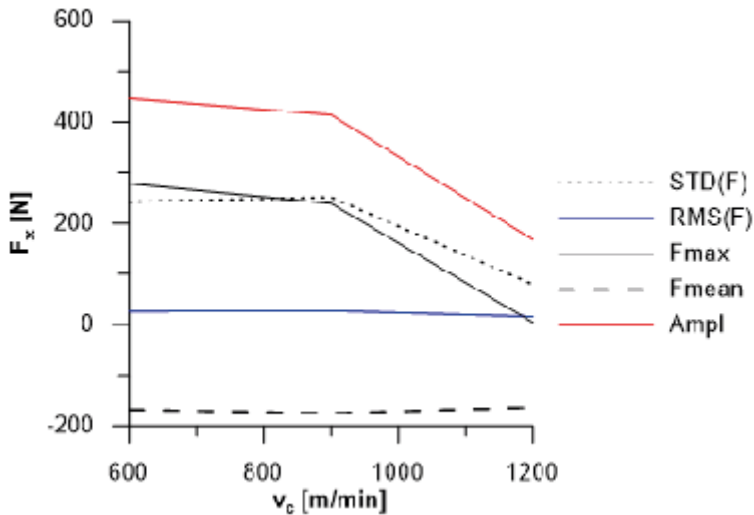
Rys. 5.1. Schemat układu pomiarowego

5.2.1. Frezowanie stopów magnezu

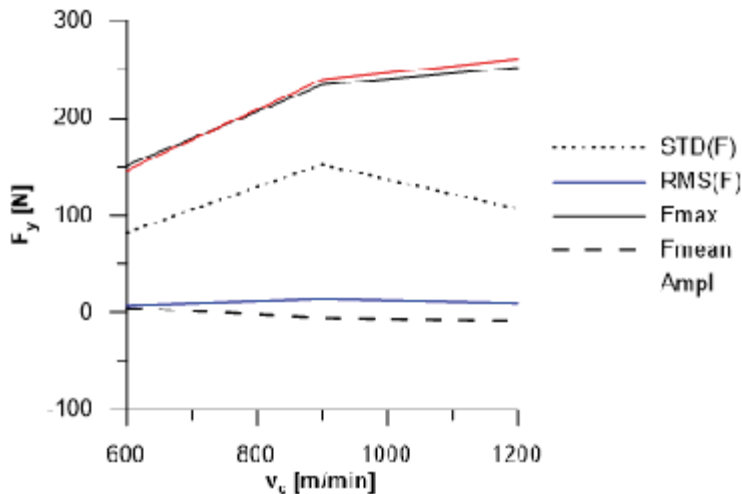
Materiałem obrabianym był stop magnezu AZ31, który poddano frezowaniu w zakresie prędkości skrawania v_c od 600 m/min do 1200 m/min i posuwów f_z od

0,05 mm/ostrze do 0,3 mm/ostrze. Narzędziem był frez walcowo – czołowy ISKAR Heli o średnicy 20 mm (HM90E90A-D20-2 z płytkami HM90APCR, liczba ostrzy $z=2$). Częstotliwość próbkowania sygnału pomiarowego została ustawiona na 5 kHz. Pozostałe parametry skrawania ustawiono jako stałe i wynosiły odpowiednio: głębokość skrawania $a_p=0,5$ mm, szerokość frezowania $a_e=16$ mm. Wyniki pomiarów sił F_x i F_y przedstawiono graficznie na rys.5.2 oraz rys. 5.3.

a)

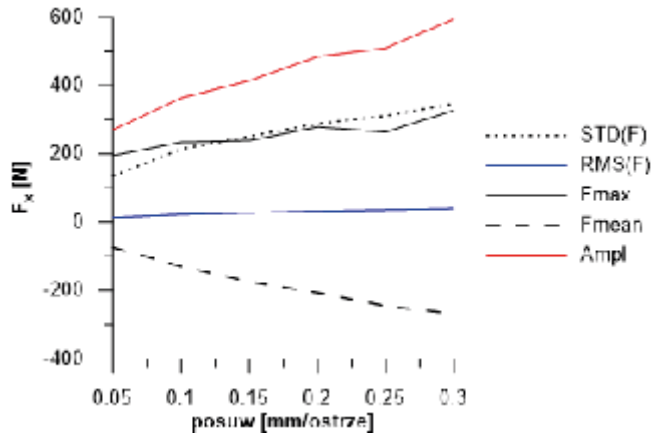


b)

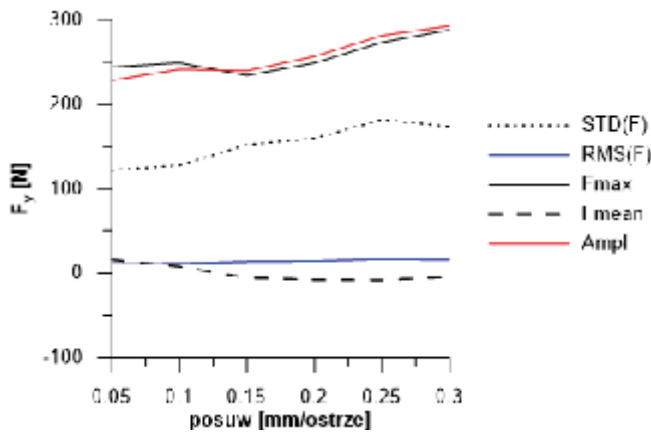


Rys. 5.2. Statystyczne parametry składowych F_x i F_y siły skrawania w funkcji prędkości skrawania

a)



b)



Rys. 5.3. Statystyczne parametry składowych F_x i F_y siły skrawania w funkcji posuwu

Charakterystyki sił otrzymane podczas frezowania stopu magnezu pokazano za pomocą wartości średniej (mean), maksymalnej (max), amplitudowej Ampl, odchylenia standardowego (STD) i wartości średniej kwadratowej RMS. Widoczne są nieliniowe zależności pomiędzy siłami a prędkością skrawania i posuwem.

Z uwagi na fakt, że proces obróbki skrawaniem jest procesem nieliniowym i złożonym, badanie jego dynamiki jest niezbędne do wykrycia krytycznych (niestabilnych) parametrów procesu. Poznanie dynamiki badanego procesu, umożliwia identyfikację i eliminację niepożądanych zjawisk, na przykład uszkodzenia narzędzia lub uderzenia narzędzia w materiał obrabiany, czy wzrost temperatury ponad wartość dopuszczalną. Zjawiska cieplne mają tu szczególne znaczenie, ponieważ stopy aluminium odznaczają się dobrym przewodnictwem cieplnym. Z reguły stopy aluminium i magnezu obrabiane są z dużymi prędkościami, dlatego też, biorąc pod uwagę wszystkie wymienione wyżej czynniki, w procesach obróbki

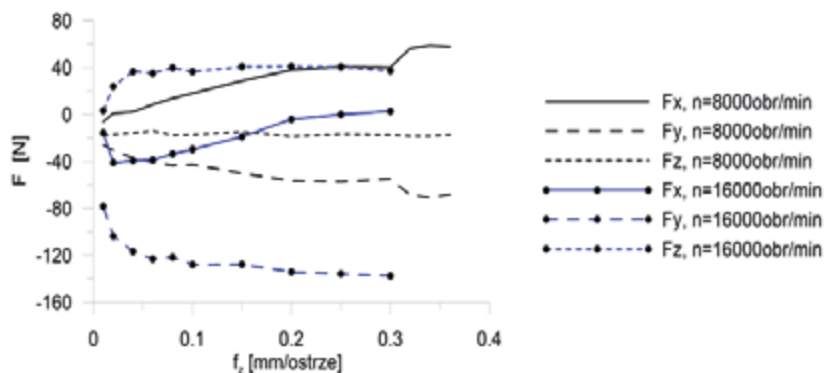
stopów Al i Mg istnieje niebezpieczeństwo powstawania drgań samowzbudnych typu „chatter”, wywołanych trzema głównymi przyczynami:

- tarcieniem pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym i/lub wiórem,
- efektem regeneracji drgań wywołanych odwzorowaniem kształtu i ruchu narzędzia w poprzednim przejściu lub odwzorowaniem kształtu wywołanego przez poprzednie ostrze tego samego narzędzia,
- efektami termo-mechanicznymi.

Wszystkie te czynniki wywołujące drgania powinny być monitorowane i analizowane bezpośrednio podczas obróbki celem kontrolowania procesu lub analizowane „offline” w celu opracowania procedur znajdowania bezpiecznych warunków skrawania.

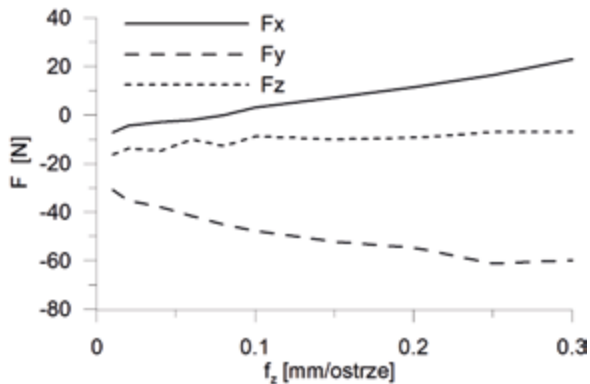
5.2.2. Frezowanie stopów aluminium

Wyniki pomiarów trzech składowych (F_x , F_y , F_z) siły skrawania dla stopu AW 7075, w przypadku dwóch różnych prędkości obrotowych wrzeciona, przedstawiono graficznie na rys. 5.4, natomiast dla stopu AlSi20 na rys. 5.5.



Rys. 5.4. Średnie wartości sił skrawania podczas frezowania stopu AW 7075

W przypadku stopu Al7075 wartości średnie siły F_x rosną wraz ze wzrostem posuwu f_z , natomiast F_y i F_z maleją, zaś podczas frezowania stopu AlSi20 rośnie zarówno siła F_x jak i F_y .



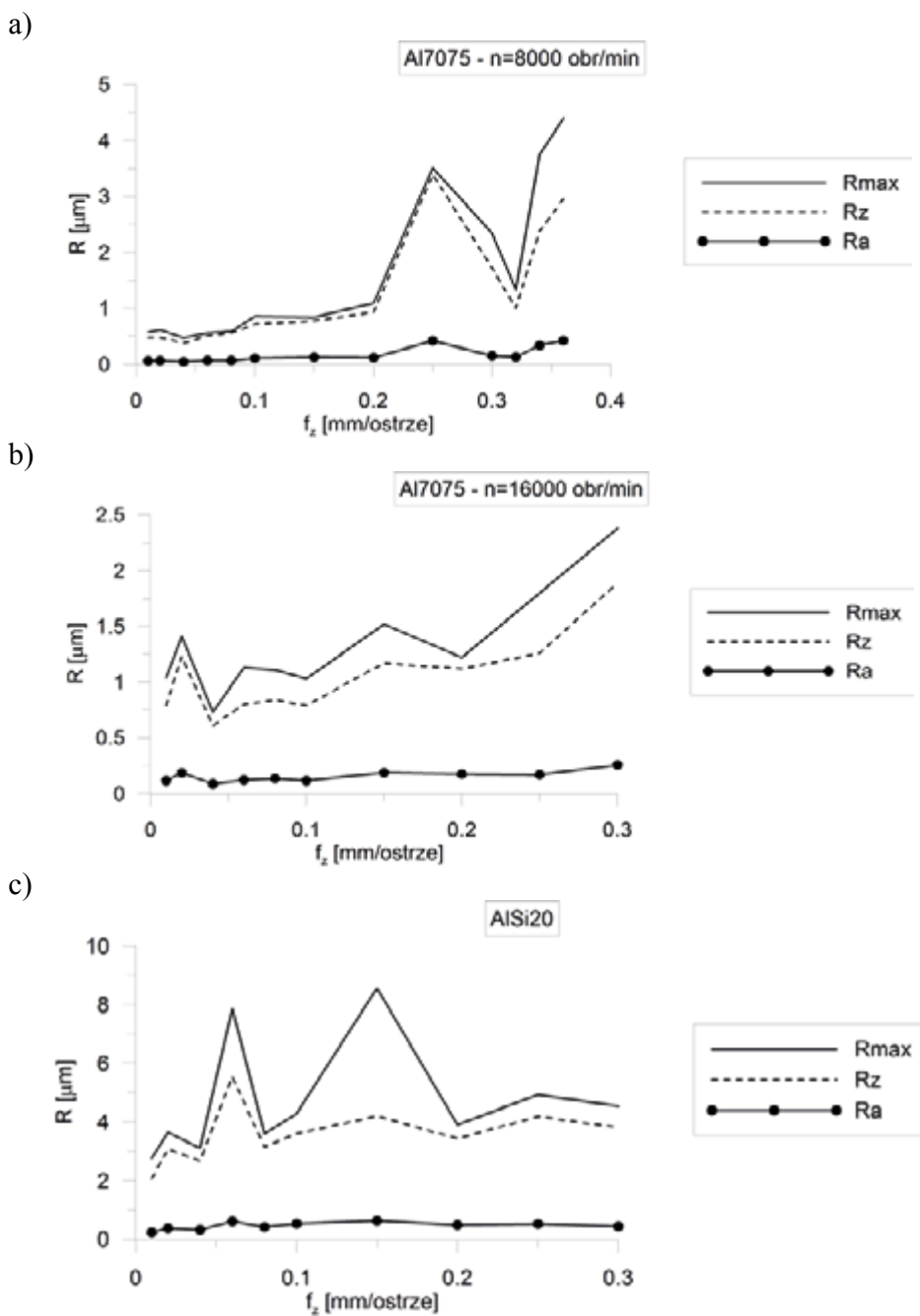
Rys. 5.5. Średnie wartości sił skrawania podczas frezowania stopu AlSi20

Po obróbce stopów aluminium zbadano chropowatość powierzchni obrobionej, mierząc parametry:

- R_a – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości,
- R_z – największa wysokość profilu,
- R_{max} – maksymalna wysokość chropowatości.

Wyniki pomiarów przedstawiono graficznie w funkcji posuwu na ostrze na rys. 5.6. Chropowatość powierzchni zobrazowana parametrami R_a , R_z , i R_{max} wzrasta znacząco powyżej $f_z=0,2$ mm/ostrze w przypadku stopu Al-7075, natomiast dla stopu AlSi20 wpływ posuwu na chropowatość powierzchni ma bardziej złożony charakter i zwiększenie posuwu powyżej $f_z=0,2$ mm/ostrze nie powoduje tak dużego wzrostu chropowatości jak w przypadku stopu AW7075. Należy jednak zauważyć, że chropowatość powierzchni stopu AlSi20 jest większa w porównaniu ze stopem AW7075.

Porównując siły skrawania stopu AW 7075 i AlSi20 w zasadzie nie zaobserwowano znaczących różnic. Amplitudy sił zawsze rosną wraz ze wzrostem posuwu. Wzrost sił skrawania mógłby sugerować, że graniczna głębokość skrawania a_{pg} maleje ze wzrostem posuwu, jednak takiej zależności nie zaobserwowano. Graniczna głębokość skrawania (a_{pg}) jest większa przy frezowaniu stopu AW 7075 niż AlSi20, natomiast wpływ posuwu na a_{pg} jest niezauważalny.



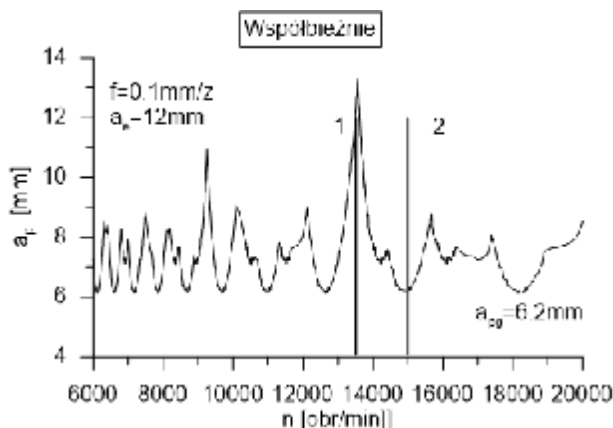
Rys. 5.6. Chropowość powierzchni po obróbce stopów AW 7075 (a, b), AlSi20 (c)

Interesujący jest fakt, że chropowatość powierzchni obrabianej zmniejsza się wraz ze wzrostem posuwu w przypadku obróbki stopu AlSi20 (w zakresie 0,15 – 0,3 mm/ostrze). Obecnie prowadzone są dalsze badania zmierzające do wyjaśnienia tego zjawiska.

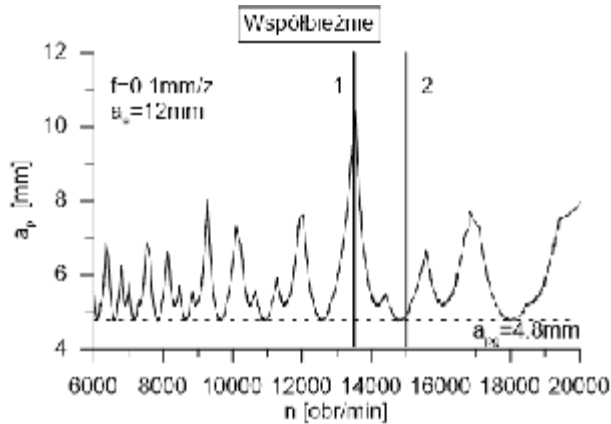
5.3. Ocena stabilności obróbki stopów aluminium i magnezu

Analiza stabilności procesu skrawania stanowi istotny aspekt badań z praktycznego punktu widzenia. Doświadczalne badania stabilności prowadzone były w 3 etapach:

1. Wyznaczenie charakterystyki układu OUPN za pomocą funkcji przejścia i wykreślenie na tej podstawie obszarów niestabilnej obróbki (tzw. krzywych workowych). Wyznaczanie charakterystyki układu OUPN polega na klasycznej, jednopunktowej analizie modalnej („impact test”) przeprowadzonej na centrum frezerskim AVIA za pomocą młotka modalnego PCB 086C03 (czułość 2.25mv/g, zakres 2224N) i akcelerometru PCB 352B10 (czułość 10mv/g, zakres 500g). Pozwala to na wyznaczenie sztywności układu, współczynnika tłumienia i częstości drgań własnych, co z kolei pozwoliło na wykorzystanie tych danych w programie CutPro9, który analitycznie wyznacza krzywe stabilności.
2. Pomiar sił podczas frezowania współbieżnego stopu AW 7075 i AlSi20 ze zmienną głębokością skrawania realizowaną dla dwóch różnych prędkości obrotowych wrzeciona.
3. Pomiar chropowatości powierzchni obrabianej za pomocą profilografometru.



Rys. 5.7. Obszary stabilności frezowania współbieżnego stopu AW 7075

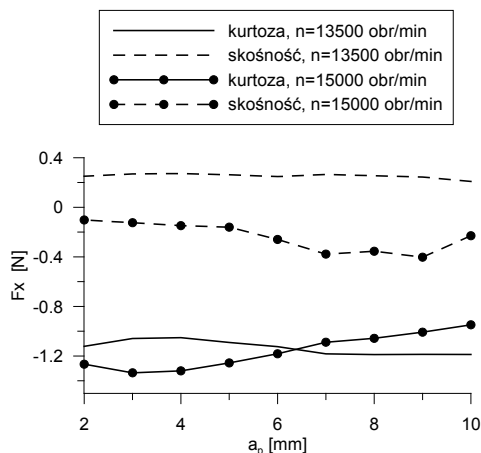


Rys. 5.8. Obszary stabilności frezowania współbieżnego stopu AlSi20

Wynikiem tak przeprowadzonych badań stabilności są krzywe workowe przedstawione na rys. 5.7 i 5.8, przy czym rys. 5.7 dotyczy stopu AW 7075, zaś rys. 5.8 – stopu AlSi20. Następnie przeprowadzono weryfikację granicznej głębokości skrawania (a_{pg}) przy dwóch prędkościach obrotowych $n_1=13500$ obr/min i $n_2=15000$ obr/min dla przypadku frezowania współbieżnego, co zaznaczono schematycznie pionowymi liniami na rys. 5.7 oraz rys. 5.8.

5.3.1. Analiza pomiarów siły skrawania stopu AW 7075

Celem weryfikacji obszarów stabilności dokonano pomiarów trzech składowych (F_x , F_y , F_z) siły skrawania dla stopu AW 7075, w przypadku prędkości $n_1=13500$ obr/min oraz $n_2=15000$ obr/min.

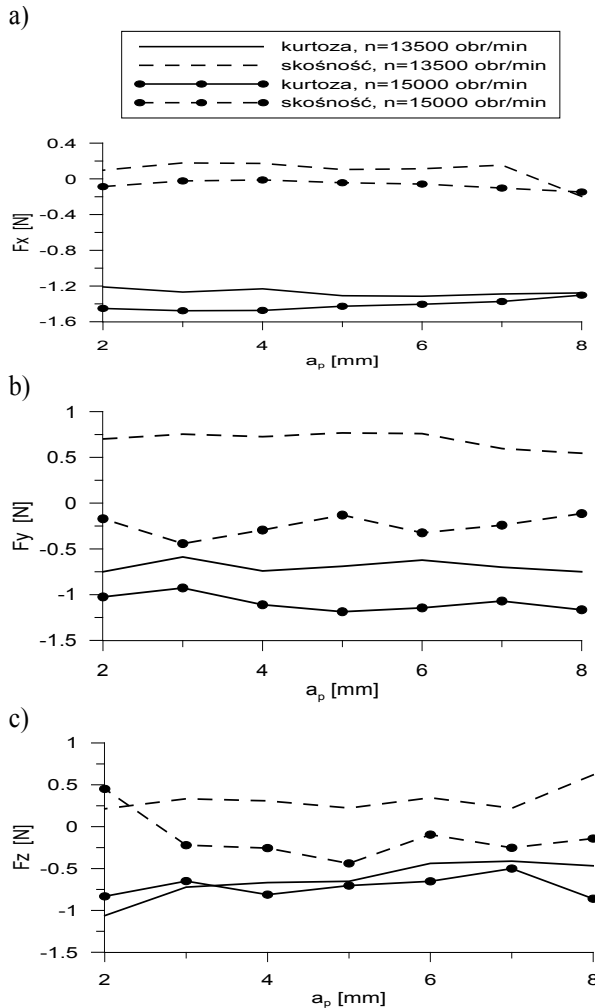


Rys. 5.9. Statystyki składowej siły skrawania F_x dla stopu AW 7075

Wejście w obszar frezowania niestabilnego można zaobserwować na wykresach przedstawiających statystyki sił. Kurtozja i skośność liczona z przebiegu czasowego sił przy poszczególnych głębokościach frezowania wykazują zmianę swoich wartości w przypadku wejścia w obszar niestabilności, co jest szczególnie widoczne w przypadku siły F_x (rys. 5.9).

5.3.2. Analiza pomiarów siły skrawania stopu AlSi20

Wartości statystyczne pomiarów sił skrawania w przypadku stopu AlSi20, przedstawiono na rys. 5.10. W tym przypadku nawet analiza statystyk nie pokazuje efektu utraty stabilności.

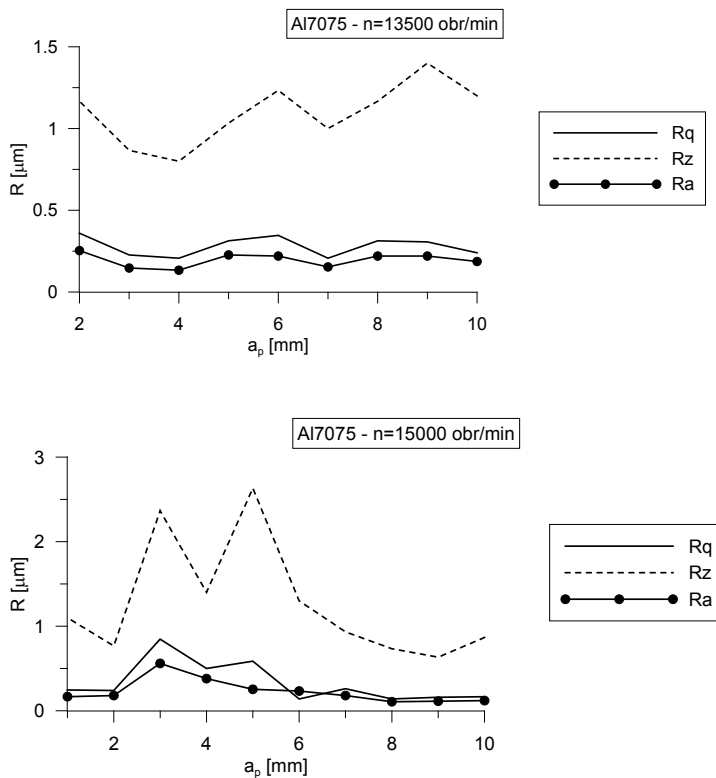


Rys. 5.10. Statystyki sił skrawania F_x (a), F_y (b), F_z (c) dla stopu AlSi20

5.3.3. Pomiary chropowatości powierzchni stopu AW 7075 i AlSi20

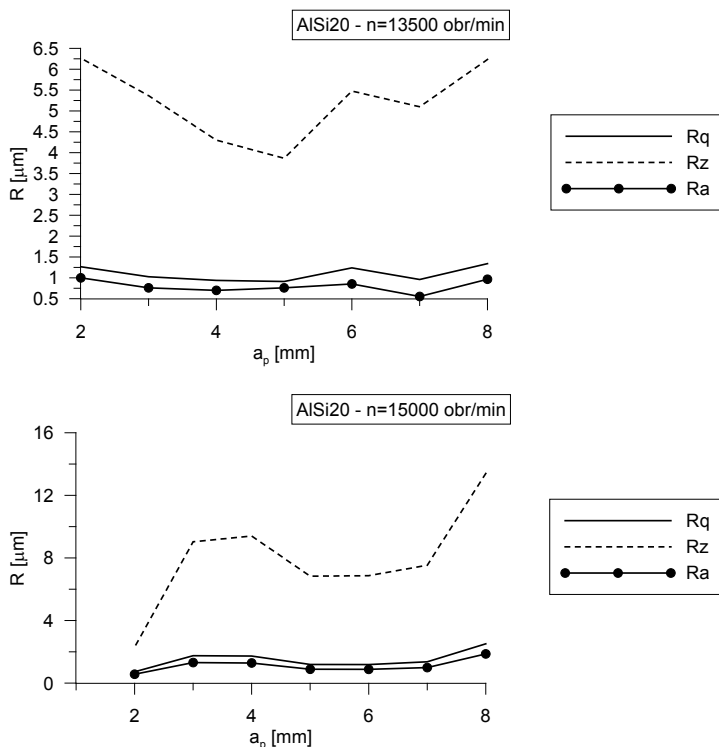
Po obróbce stopów aluminium zbadano chropowatość powierzchni obrabianej w funkcji głębokości skrawania, mierząc parametry:

- R_a – średnia arytmetyczna rzędnych profilu,
- R_z – największa wysokość profilu,
- R_q – średnia kwadratowa rzędnych profilu.



Rys. 5.11. Chropowatość powierzchni po obróbce stopu AW 7075

Wyniki pomiarów przedstawiono graficznie w funkcji głębokości skrawania na rys. 5.11 oraz rys. 5.12, odpowiednio dla stopu AW 7075 i AlSi20, przy dwóch różnych prędkościach obrotowych wrzeciona. Uzyskane wyniki nie potwierdzają wzrostu chropowatości powierzchni wraz ze wzrostem głębokości skrawania, wręcz przeciwnie przy prędkości $n_2=15000$ obr/min w przypadku stopu AW 7075 obserwowany jest spadek parametrów opisujących chropowatość obrabianej powierzchni. Jedynie dla stopu AlSi20 chropowatość powierzchni rośnie ze wzrostem głębokości skrawania.



Rys. 5.12. Chropowość powierzchni po obróbce stopu AlSi20

Celem przeprowadzonych badań było wykazanie wpływu głębokości skrawania na stabilność procesu mierzoną poprzez wartości sił skrawania i chropowości powierzchni obrobionej. Jak wynika z przedstawionych rezultatów nie można jednoznacznie ocenić stabilności procesu na tej podstawie. Rezultaty uzyskane za pomocą programu CutPro w żadnym stopniu nie potwierdziły występowania obszarów niestabilnego frezowania w badanym zakresie parametrów. W dalszej części prac nad projektem konieczna jest weryfikacja metody uzyskiwania „krzywych workowych” za pomocą programu CutPro. Weryfikacja ta będzie miała na celu budowę własnego modelu procesu frezowania w taki sposób, aby wyniki doświadczalne wykazywały lepszą zgodność z rezultatami numerycznymi i analitycznymi uzyskanymi za pomocą modelu. Z drugiej zaś strony, w opracowaniu wykazano, że prosta analiza statystyczna przebiegów czasowych sił może nie być wystarczająca do oceny procesu skrawania.

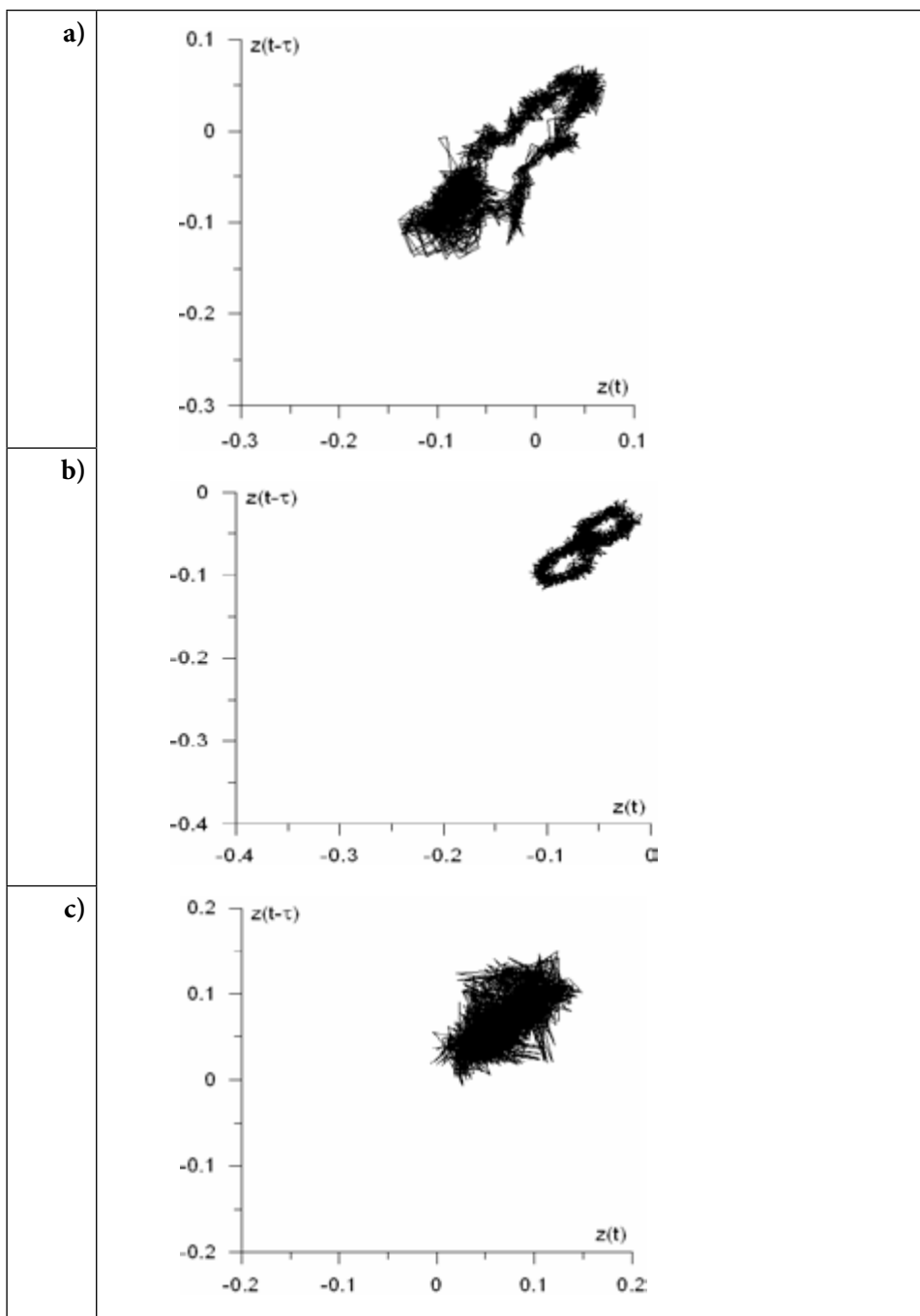
5.4. Dynamiczne wskaźniki skrawalności

Technologiczne wskaźniki oceny skrawalności znane i stosowane od lat nie zawsze muszą być skuteczne w przypadku procesów, w których dominują nieliniowe zjawiska dynamiczne, dlatego też celowe jest wprowadzenie tzw. dynamicznych wskaźników, które jakościowo zidentyfikują zjawiska zachodzące w procesach skrawania różnych materiałów, w tym stopów aluminium i magnezu. W niniejszym opracowaniu zastosowano metodę współrzędnych opóźnionych.

W badaniach doświadczalnych zwykle mierzone są siły i momenty skrawania, przemieszczenia (drgania), a czasem temperatura i emisja akustyczna. W każdym z tych przypadków sygnały pomiarowe zapisywane są w dziedzinie czasu jako przebiegi czasowe. Dokładna analiza tych sygnałów pozwala na wyciągnięcie pewnych wniosków i zdefiniowanie wskaźników, które następnie mogą zostać użyte jako tzw. dynamiczne wskaźniki skrawalności. Wskaźniki te w odróżnieniu od wskaźników technologicznych nie oceniają bezpośrednio wydajności procesu ale jego charakter. Dynamikę procesu skrawania można zobrazować za pomocą sygnału reprezentującego obserwację tylko jednej zmiennej (jednego sygnału). Zgodnie z założeniami metody współrzędnych opóźnionych, pojedyncza obserwacja zawiera opis dynamiki całego systemu a stan układu może zostać zbadany przez rekonstrukcję atraktora w tzw. przestrzeni fazowej o wymiarze zanurzeniowym w , obserwując sygnał z pewnym opóźnieniem czasowym τ_1 . Wówczas szereg czasowy $x(t)$ zostaje opisany równaniem:

$$x(t) = [S(t), S(t + \tau_1), \dots, S(t + (w-1)\tau_1)] \quad (5.1)$$

Analiza przestrzeni fazowej jest pierwszym wskaźnikiem oceny dynamiki procesu skrawania, która pozwala zidentyfikować rodzaj ruchu (rys. 5.13).



Rys. 5.13. Zrekonstruowany atraktor na płaszczyźnie fazowej obrazujący ruch okresowy z zaburzeniami (a), subharmoniczny (b) i stochastyczny (c)

Inną metodą wykorzystującą metodę współrzędnych opóźnionych są wykresy rekurencyjne (RP – recurrence plot) bazujące na rekurencji dwóch punktów. Jeżeli wybierzemy punkt na trajektorii x_i (stan układu w pewnej chwili czasu), to po jakimś czasie, punkt na sąsiedniej trajektorii x_j (inny stan układu), znajdzie się dostatecznie blisko. Takie dwa punkty nazywamy punktami rekurencyjnymi. Innymi słowy, dwa punkty nazywamy rekurencyjnymi, jeżeli spełniają warunek:

$$\left\| \begin{matrix} \vec{x}_i \\ \vec{x}_j \end{matrix} \right\| < \varepsilon \quad (5.2)$$

gdzie: ε oznacza maksymalną odległość między punktami, a $\|\bullet\|$ normę euklidesową. Punkty rekurencyjne oznaczane są jako ciemne punkty na mapie. Analiza linii utworzonych przez punkty rekurencyjne pozwala na określenie rodzaju zachowań. Długie diagonalne linie świadczą o okresowości ruchu, zaś krótkie (prawie punkty) równomiernie rozłożone na całej powierzchni są charakterystyczne dla przebiegów losowych (rys. 5.14). Pokazany przykład (rys. 5.14) otrzymano na przykładzie procesu skrawania podobnie jak rys. 5.13. Rys. 5.14a odpowiada drganiom okresowym z fluktuacjami (zaburzeniami stochastycznymi), rys. 5.14b drganiom subharmonicznym (2-okresowe), zaś rys. 5.14c wskazuje na ruch regularny ze znacznym komponentem stochastycznym.

Z praktycznego punktu widzenia ocena procesu na podstawie zrekonstruowanego atraktora czy wykresów rekurencyjnych może nie być zbyt wygodna. Wydaje się, że zastosowanie wskaźników obliczanych na podstawie statystyki punktów rekurencyjnych oraz linii pionowych i poziomych będzie miało większe praktyczne zastosowanie. Z ważniejszych należy wyróżnić:

- RR (Recurrence Rate) – stosunek liczby punktów rekurencyjnych, do liczby wszystkich rozpatrywanych punktów,
- DET (determinizm) – stosunek punktów rekurencyjnych tworzących linie diagonalne, do wszystkich punktów rekurencyjnych,
- LAM (laminarność) – stosunek punktów rekurencyjnych tworzących linie pionowe, do wszystkich punktów rekurencyjnych.

Pozwalają one na rozróżnienie zachowań regularnych od nieregularnych, np. $DET \cong 1$, $LAM \cong 0$ świadczy o zachowaniu regularnym, natomiast $DET \cong 0$ oraz $LAM \gg 0$ jest charakterystyczne dla nieregularności.

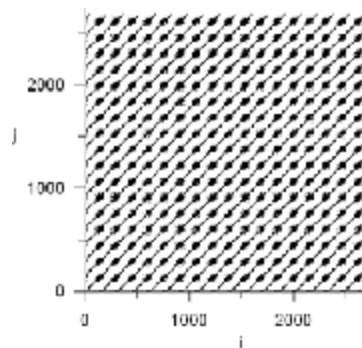
Wśród innych metod służących do analizy przebiegów czasowych należy zwrócić uwagę na:

- **Wykładnik Hursta H**, który jest narzędziem statystycznym, służącym klasyfikacji szeregów czasowych – na szeregi losowe i nielosowe, przy czym nie ma znaczenia czy te pierwsze mają rozkład gaussowski. Szacowanie wykładnika Hursta związane jest z tzw. analizą przeskalowanego zakresu, w skrócie analizą

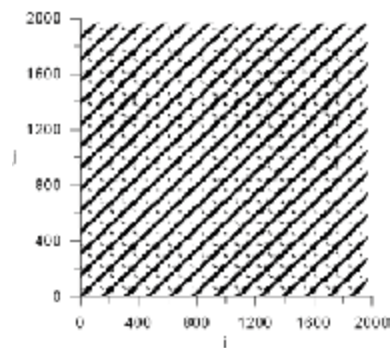
R/S, która polega na dzieleniu zakresu wahań przez odchylenie standardowe obserwacji. Wykładnik Hursta dzieli szeregi na trzy grupy:

- antypersystentne, gdy $0 < H < 0,5$;
- persystentne, gdy $0,5 < H < 1$;
- losowe, gdy $H = 0,5$.

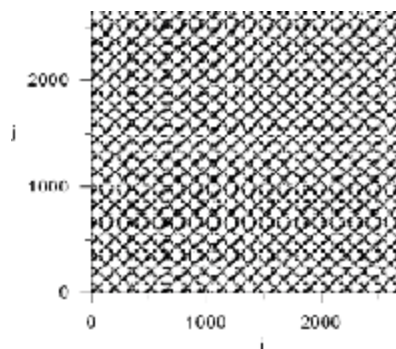
a)



b)



c)



Rys. 5.14. Wykresy rekurencyjne dla ruchu okresowego z zaburzeniami (a), subharmonicznego (b) i stochastycznego (c)

Szeregi antypersystentne charakteryzują się tendencją do powracania do średniej, dokonują częstych zwrotów kierunku przemieszczania. Przykładowo, jeśli $H=0,3$, wtedy istnieje 70% szansy, że trend zmieni kierunek wobec kierunku aktualnie obserwowalnego. Przeciwnymi właściwościami charakteryzują się szeregi persystentne. W ich przypadku występuje zjawisko wzmacniania trendu, tzn. jeśli $H=0,7$, wówczas istnieje 70% prawdopodobieństwo, że istniejący trend zostanie utrzymany. Trzecią grupą szeregów są szeregi losowe, dla których $H=0,5$. W takim przypadku mamy do czynienia z niezależnymi zmiennymi losowymi o jednakowym rozkładzie.

- **Wymiar korelacyjny** – metoda ilościowa, wykorzystująca własności statystyczne szeregu czasowego. Metoda pozwala przybliżyć wymiar fraktalny, który jest liczbą niecałkowitą dla dynamiki chaotycznej. Wymiar korelacyjny jest miarą prawdopodobieństwa znalezienia dwóch punktów o odległości mniejszej niż założony ϵ . Wymiar korelacyjny może być liczbą naturalną, wymierną lub nieskończony:
 - $D_2 \in N$ – dynamika regularna,
 - $D_2 \notin N$ – dynamika nieregularna.
- **Wykładnik Lapunova** – metoda ilościowa, określająca rozbieganie się w czasie pobliskich trajektorii, czyli tendencję zachowań nieregularnych. Trajektorie mogą rozbiegać się w różnych kierunkach i dlatego istnieje wiele wykładników Lapunova, jednak dla danych doświadczalnych, możliwe jest obliczenie największego z nich, co wystarcza na odróżnienie stanu regularnego od nieregularnego, gdyż.:
 - $\lambda_1 > 0$ – dla zachowań nieregularnych,
 - $\lambda_1 \leq 0$ – dla zachowań regularnych.

Na podstawie analizy przedstawionych powyżej wskaźników oceniających dynamikę procesu możliwa jest identyfikacja niepożądanych zachowań w procesie skrawania materiałów.

Literatura

1. Adamski, W., *Wybrane kierunki zwiększania wydajności procesów skrawania*, Mechanik, Vol. 5-6, 2009, pp. 540-546.
2. Grzesik, W., *Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych*, WNT Warszawa 2010.
3. Oczóś, K. E., *Postępy w obróbce skrawaniem. Obróbka z dużymi prędkościami*, Mechanik, Vol. 3, 1998, pp. 109-124.

4. Oczóś, K. E., Kawalec, A., *Kształtowanie metali lekkich*, PWN Warszawa 2012.
5. Olszak, W., *Obróbka skrawaniem*, WNT, Warszawa 2008.
6. Schulz, H., Abele, E., and Sahn, A., *Material aspects of chip formation in HSC machining*, Annals of the CIRP, Vol. 50, No. 1, 2001, pp. 45-48.
7. Smith, S. and Tlustý, J., *Current trends in high-speed machining*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119, 1997, pp. 664-666.

6. Narzędzia do obróbki skrawaniem stopów aluminium i magnezu

Wraz z rozwojem maszyn technologicznych zmieniają się również narzędzia skrawające. Nieustanne zwiększanie wydajności procesów obróbki skrawaniem wiąże się z potrzebą stosowania coraz lepszych narzędzi skrawających. Metody obróbki skrawaniem są szeroko stosowane w procesie wytwarzania elementów ze stopów aluminium i magnezu stosowanych w lotnictwie. Zastąpienie składanych konstrukcji przez jednolite, takich elementów statków powietrznych jak wręgi czy wsporniki, spowodowało, że koniecznym stało się dodatkowe zwiększenie wydajności procesu. Najczęściej w takich przypadkach przygotówkę stanowi prostopadłościan, a masa gotowego elementu stanowi nawet mniej niż 10% masy wejściowej przygotówki. Dodatkowym utrudnieniem są powierzchnie o skomplikowanym zarysie, czy elementy cienkościenne o dużej wysokości utrzymane w zakresie małych tolerancji. Efektywna obróbka stopów lekkich uzależniona jest w znacznym stopniu od geometrii stosowanych narzędzi skrawających. Nowoczesne narzędzia stosowane w połączeniu z nowymi strategiami obróbczymi, coraz większymi prędkościami skrawania i posuwami osiąganymi na maszynach technologicznych, muszą sprostać nowym wymaganiom.

6.1. Materiałowa i geometryczna charakterystyka narzędzi do skrawania stopów aluminium i magnezu

Głównymi wyznacznikami wyboru narzędzi, decydującymi o ich geometrii, są: właściwości stopów aluminium i magnezu, żądana wydajność procesu, strategia obróbki, rodzaj obróbki, geometria przedmiotu obrabianego oraz chropowatość powierzchni i tolerancje wymiarów obrabianego przedmiotu.

Ze względu na skrawalność stopy aluminium dzieli się na trzy grupy: stopy o zawartości krzemu poniżej 10% obrobione cieplnie, stopy bez obróbki cieplnej oraz stopy o zawartości krzemu powyżej 10%. Dodatkowo, ze względu na wpływ na zużycie narzędzi, w literaturze można znaleźć podział na stopy o zawartości 10-20% krzemu i powyżej 20% krzemu. Do gorzej obrabialnych materiałów zaliczane są stopy nisko-krzemowe nieobrabiane cieplnie. Odnaczają się one

największą skłonnością do powstawania narostu i „rozmazywania się”. Stopy odlewnicze z dużą zawartością krzemu oddziałują mocno ściernie, co stanowi duży problem, związany z przyspieszonym zużyciem powierzchni przyłożenia. Wykazują one również tendencję do powstawania narostu. Pozostałe stopy, tzw. „durable”, zaliczane są do dobrze skrawalnych stopów aluminium. W stosunku do grupy stopów o zawartości krzemu mniejszej od 10%, zaleca się stosowanie ostrzy niepokrywanych, o ostrej krawędzi skrawającej i polerowanej powierzchni natarcia. Zmniejsza to w istotny sposób powstawanie narostu oraz ogranicza niebezpieczeństwo zaklejenia rowków wiórowych. Ze względu na wytrzymałość narzędzi pełno-węglkowych zaleca się stosowanie frezów o trzech ostrzach. Zmniejszanie liczby ostrzy w podanym zakresie zwiększa pojemność rowka wiórowego, ale znacząco wpływa na zmniejszenie wytrzymałości rdzenia, w ten sposób ograniczając możliwość wykorzystania większej mocy frezarki i większego posuwu. Zwiększenie liczby ostrzy zmniejsza pojemność rowka wiórowego, a tym samym wydajność objętościową obróbki. Dla materiałów o podwyższonej zawartości krzemu zaleca się stosowanie narzędzi o ostrzach z węglików pokrywanych lub z polikrystalicznego diamentu (PCD), gdyż duża zawartość krzemu drastycznie zmniejsza trwałość ostrza.

Podstawowym materiałem stosowanym na frezy trzpieniowe do obróbki stopów aluminium i magnezu są węgliki spiekane drobnoziarniste i ultra drobnoziarniste (rys. 6.1). Charakteryzują się one zwiększoną twardością ($HV_{0,05} > 2000$), wysokim współczynnikiem sprężystości wzdłużnej ($E > 600$ GPa), dobrą wytrzymałością na zginanie oraz dużą odpornością na zużycie ściernie. Materiały te wykorzystuje się głównie w obróbce stopów aluminium o zawartości krzemu powyżej 10% [2].

W przypadku nadeutektycznych stopów aluminiowo-krzemowych stosuje się powłoki diamentowe nanoszone metodą CVD oraz powłoki WC/C. Należy jednak pamiętać, że stosowanie powłok powoduje zwiększenie promienia krawędzi skrawających, co wpływa na zwiększenie sił skrawania [2, 15]. Wydajność obróbki mierzona jest objętością materiału usuwaną w jednostce czasu. W przypadku doboru narzędzi pod kątem maksymalnego zwiększenia wydajności należy wybrać narzędzie o największej średnicy i największej liczbie ostrzy. W obróbce kieszeni dobiera się głębokość skrawania i szerokość frezowania tak, aby w jak najmniejszej liczbie przejść usunąć materiał, zostawiając naddatek na obróbkę wykończeniową. Dąży się do tego, aby naddatek na obróbkę wykończeniową posiadał stałą wartość we wszystkich miejscach przedmiotu obrabianego. Średnica narzędzia powinna umożliwiać bezpieczne zagłębianie frezu oraz obróbkę z maksymalnymi parametrami technologicznymi. Ponieważ frezy pełnowęglkowe produkuje się maksymalnie do średnicy $d = 25$ mm, nie zawsze istnieje ekonomiczne uzasadnienie zastosowania takiego frezu. W przypadku obróbki dużych elementów lotniczych należy stosować narzędzia składane, wykorzystujące pełną moc i zakres posuwów maszyn technologicznych.

Problem zużycia ściernego narzędzi podczas obróbki stopów aluminium o zawartości krzemu poniżej 10% jest praktycznie pomijalny. Główną przyczyną uszkodzenia ostrza jest narost i zalepianie rowków wiórowych. Cyklicznie powstający narost może być przyczyną oderwania części krawędzi skrawającej lub uszkodzenia powłoki. Wybór strategii obróbki decyduje o geometrii ostrza narzędzi. Obecnie w obróbce skrawaniem stopów aluminium funkcjonują dwa pojęcia HPC i HSC. Pierwsza strategia to skrawanie z dużą wydajnością przez optymalizację parametrów technologicznych, w tym maksymalizowanie głębokości skrawania i posuwu. Druga strategia to maksymalizowanie prędkości skrawania. Technologia HPC wiąże się z potrzebą zapewnienia dużej mocy obrabiarki. Zastosowanie mają narzędzia składane wieloostrzowe. W przypadku zastosowania HSC zwiększa się maksymalnie prędkość skrawania przy utrzymaniu głębokości skrawania na poziomie zwykle nie przekraczającym $a_p = 0,5$ mm. Dzięki temu siły skrawania są dużo mniejsze, co wiąże się ze zmniejszeniem odkształceń przedmiotu obrabianego i zwiększeniem dokładności obróbki. Zastosowanie strategii trochoidalnych, umożliwia utrzymanie stałego kąta opasania narzędzia.



Rys. 6.1. Zestaw frezów pełnowęglkowych do obróbki HPC i HSC

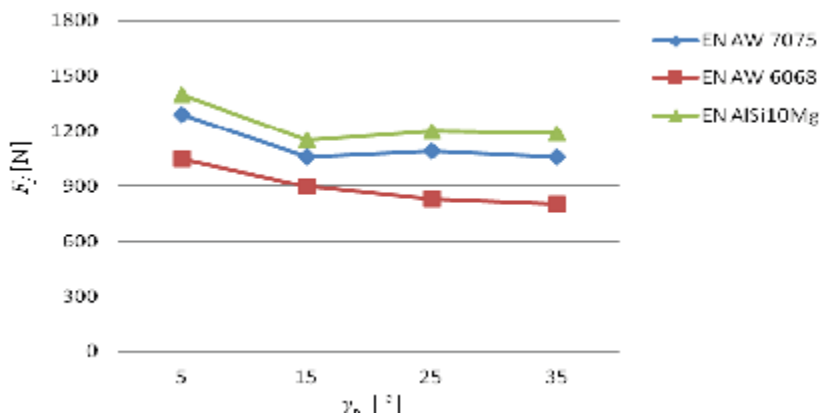
Rodzaj obróbki również determinuje geometrię narzędzia. Obróbkę zgrubną można powiązać z obróbką wysokowydajną (HPC), natomiast wykończeniową – z obróbką z dużymi prędkościami (HSC). W większości przypadków w obróbce wykończeniowej wykorzystuje się monolityczne frezy węglkowe niepokrywane o geometrii dedykowanej dla stopów aluminium. Jedną z ważnych cech narzędzia,

wpływających na poprawę jakości powierzchni, jest długość ostrza części roboczej, która ma bezpośredni wpływ na sztywność narzędzia. Należy zawsze stosować narzędzia o możliwie najkrótszej części roboczej. Minimalizowanie długości narzędzi, a zwłaszcza długości części roboczych, zwiększa sztywność i zmniejsza drgania, a w konsekwencji, następuje zwiększenie dokładności wymiarowo-kształtowej przedmiotu obrabianego i zmniejszenie wysokości nierówności powierzchni [1, 9].

6.2. Wpływ geometrii ostrza na siły skrawania podczas frezowania stopów aluminium

Przebieg i wyniki obróbki w dużym stopniu zależą od geometrii ostrza narzędzi.

Kąt natarcia γ ma bardzo duży wpływ na proces formowania wióra. Na rys. 6.2 przedstawiono wpływ kąta natarcia γ_n na siłę posuwową F_f . Największą wartość siły zaobserwowano dla kąta $\gamma_n=5^\circ$.



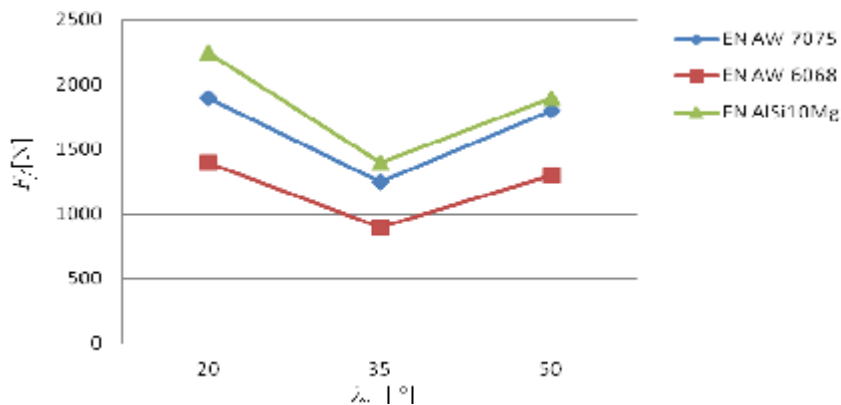
Rys. 6.2. Wpływ kąta natarcia γ_n na siłę posuwową F_f [17]

Zmniejszanie kąta natarcia powoduje zwiększenie współczynnika spęczenia wióra. W przypadku frezu trzpieniowego dobór kąta natarcia jest kompromisem pomiędzy wytrzymałością ostrza a zmniejszeniem spęczenia wióra. Nadmierne zwiększanie kąta γ powoduje osłabienie ostrza i możliwość pojawienia się wykruszeń, pomimo, że zapewnia się łagodniejszy spływ wióra. Dotychczasowe badania wykazały, że optymalny kąt natarcia frezu do obróbki stopów aluminium to 12° - 18° [3, 4]. Mniejsze kąty prowadzą do nadmiernego wzrostu sił skrawania, kształtowania się niekorzystnego kształtu wiórów oraz powstawania narostu [1,7].

Kąt przyłożenia α odgrywa ważną rolę w procesie tarcia między powierzchnią przyłożenia a obrabianym materiałem. Mniejsze kąty przyłożenia powodują większy styk narzędzia z powierzchnią przedmiotu obrabianego a tym samym

większe siły tarcia i skrawania. Zwiększenie stabilności procesu można uzyskać przez zmniejszenie kąta przyłożenia α . Badania pokazują, że optymalne są wartości tego kąta w przedziale 7° - 10° [3, 4]. W przypadku kątów większych następuje zwiększenie zużycia powierzchni przyłożenia oraz powstawanie narostu [2, 8].

Kąt pochylenia linii śrubowej λ_s wpływa na zmianę wartości sił skrawania. Na rys. 6.3 pokazano wpływ kąta pochylenia linii śrubowej λ_s na siłę posuwową F_f . Dla $\lambda_s = (20 - 35)^\circ$ widoczne jest zmniejszenie wartości siły posuwowej. Dla kątów λ_s większych od 35° można zauważyć niewielki wzrost wartości siły F_f . Kąt pochylenia linii śrubowej λ_s wpływa również na moment skrawania M_c (rys. 6.4). Ze wzrostem kąta pochylenia linii śrubowej następuje ułatwienie spływu wiórow, co sprzyja zmniejszaniu siły, a jednocześnie następuje wydłużenie czynnej krawędzi skrawającej, co jest czynnikiem powodującym zwiększenie sił skrawania.



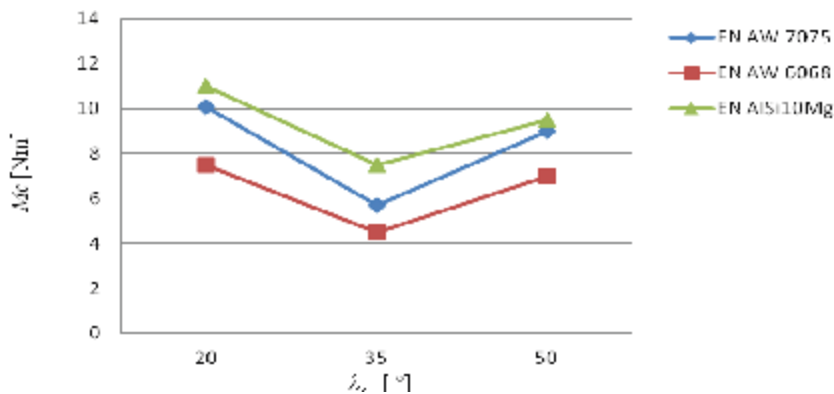
Rys. 6.3. Wpływ kąta pochylenia linii śrubowej λ_s na siłę posuwową F_f [17]

W zależności od kąta λ_s następuje okresowa zmiana przekroju warstwy skrawanej. Zmienia się również pojemność rowków wiórowych. W obróbce stopów aluminium najkorzystniejszy zakres kątów pochylenia linii śrubowej mieści się w przedziale 25 - 30° [3, 4, 8]. Większe kąty powodują zwiększenie długości styku z materiałem obrabianym, co skutkuje zwiększeniem sił skrawania, a z geometrycznego punktu widzenia – zmniejszeniem objętości rowków wiórowych. Kąt λ_s wpływa również na kierunek odprowadzania wiórow. Należy zwrócić uwagę, że przy dużych kątach rośnie wartość siły osiowej, co może mieć wpływ na możliwości eksploatacyjne wrzeciona [6, 7].

Na przebieg procesu skrawania wpływa też liczba ostrzy narzędzia. Większa liczba ostrzy zapewnia lepszy stopień pokrycia materiału oraz większą prędkość posuwu v_f dla utrzymywanego stałego posuwu na ostrze f_z . Jednak większa ilość ostrzy powoduje zmniejszenie pojemności rowka wiórowego. Zmniejszenie objętości rowka wpływa niekorzystnie na zmianę kształtu wióra i jego formowanie.

Zastosowanie nierównomiernej podziałki ostrzy skrawających zapobiega powstawaniu drgań samowzbudnych. Optymalna ilość ostrzy frezów do obróbki stopów aluminium zawiera się w przedziale 2-5, w zależności od średnicy narzędzia i rodzaju prowadzonej obróbki [1, 4, 9].

Promień zaokrąglenia naroża r_e również ma wpływ na pracę narzędzia. Zwiększone promienie stosuje się w zależności od potrzeb geometrycznych przedmiotu obrabianego. Zwiększenie promienia powoduje zwiększenie sił skrawania, ale i stabilizuje proces obróbki. Ponadto zwiększenie promienia zwiększa wytrzymałość krawędzi skrawającej [15, 17].



Rys. 6.4. Wpływ kąta pochylenia linii śrubowej λ_s na moment skrawania M_c [17]

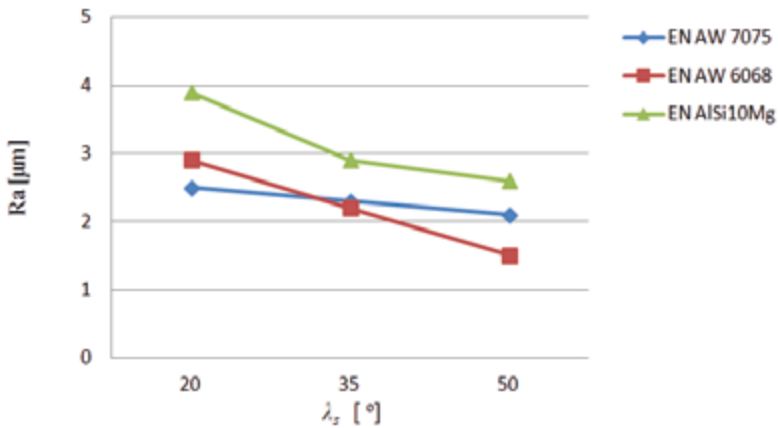
Elementy lotnicze charakteryzują się występowaniem powierzchni swobodnych oraz cienkich i wysokich ścian. Wiąże się to z koniecznością stosowania odpowiednich strategii obróbczych. Powoduje też większą możliwość występowania drgań. Aby zapobiegać niekorzystnym zjawiskom związanym z drganiami w narzędziach stosuje się zmienną podziałkę ostrzy, zmienną długość ostrzy i zmienny kąt wzniosu linii śrubowej [4].

Cechą znacznie wpływającą na dokładność obróbki jest wykonanie narzędzi ze zmniejszonymi tolerancjami części chwytowej, co wpływa na zwiększenie dokładności obróbki, zwłaszcza tam gdzie wymagana jest powtarzalność mocowania oraz występują zawężone tolerancje części krytycznych.

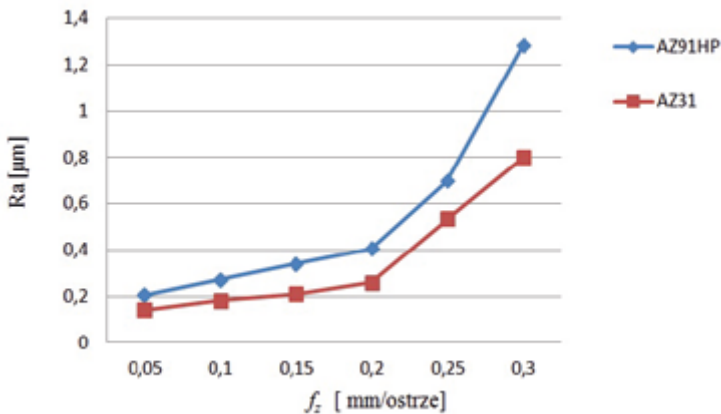
6.3. Wpływ kąta pochylenia linii śrubowej frezu i posuwu na chropowatość powierzchni po frezowaniu

Chropowatość obrobionej powierzchni uzależniona jest od geometrii ostrza. Wpływ kąta pochylenia linii śrubowej na chropowatość powierzchni przedstawiono na rys. 6.5.

Widoczny jest spadek wartości parametru chropowatości Ra wraz ze wzrostem kąta pochylenia linii śrubowej λ_s , ale zależność ta jest zróżnicowana dla poszczególnych stopów. W najmniejszym stopniu chropowatość powierzchni zmniejsza się dla stopu EN AW 7075. Różnice te wynikają z różnych skłonności poszczególnych stopów do tworzenia narostu. W przypadku stopu EN AW 7075 problem ten nie jest istotny, natomiast w pozostałych stopach efekt powstawania narostu zmniejsza się wraz ze zmniejszeniem oddziaływania wióra na powierzchnię natarcia, co ma miejsce w przypadku zwiększania kąta λ_s .



Rys. 6.5. Wpływ kąta pochylenia linii śrubowej λ na chropowatość powierzchni Ra



Rys. 6.6. Wpływ posuwu f_z na chropowatość powierzchni Ra [18]

W celu uzyskania najmniejszej chropowatości powierzchni, do obróbki stopów aluminium i magnezu zaleca się zastosowanie narzędzi z ostrzami wykonanymi

z polikrystalicznego diamentu (PKD). Pozwala to na uzyskanie jakości powierzchni porównywalnej, na przykład, z procesem szlifowania wykończeniowego.

Parametrem technologicznym silnie oddziałującym na chropowatość powierzchni jest posuw. Na rys. 6.6. przedstawiono wpływ posuwu f_z na chropowatość powierzchni po frezowaniu stopów magnezu AZ91HP oraz AZ31.

Warto zauważyć, że nawet dla stosunkowo wysokich wartości posuwu parametr Ra jest stosunkowo niewielki.

6.4. Nowoczesne rozwiązania narzędziowe stosowane w obróbce stopów aluminium i magnezu

Do obróbki ubytkowej stopów aluminium i magnezu wykorzystuje się najczęściej technologie: frezowania, toczenia i wiercenia. Ze względu na właściwości adhezyjne unika się szlifowania tych stopów. Szczególne właściwości stopów aluminium i magnezu, takie jak mały opór właściwy skrawania, silne właściwości adhezyjne, powodujące powstawanie narostu i zaklejanie przestrzeni wiórowych, powodują, że do obróbki ubytkowej używa się narzędzi o szczególnych właściwościach geometrycznych.

Do obróbki toczeniem stopów aluminium używa się noży składanych z płytkami z węglików spiekanych. W przypadku obróbki zgrubnej zaleca się zastosowanie węglika spiekane go pokrywanego metodą PVD, o zwiększonej odporności na zużycie. Do obróbki półwykończeniowej i wykończeniowej stosuje się płytki niepokrywane. W przypadku obróbki wykończeniowej, gdy dąży się do małej chropowatości powierzchni, należy zastosować płytki z wkładką z diamentu polikrystalicznego (PKD). W przypadku obróbki zgrubnej stopów aluminium o zawartości krzemu powyżej 13%, trwałość narzędzi ulega drastycznemu skróceniu. W tym przypadku zaleca się stosowanie płytek pokrywanych metodą PCD. W obróbce stopów aluminium i magnezu zawsze zaleca się stosowanie narzędzi o kątach dodatnich i szlifowanych powierzchniach natarcia [1, 11].

Podczas toczenia powstają długie wióry wstępowe, które uniemożliwiają obróbkę bez kontroli procesu. Skuteczność łamania i odprowadzania wiórów ze strefy skrawania zależy od geometrii płytki skrawającej. W tym celu na powierzchni natarcia wykonuje się dodatkowe powierzchnie pomocnicze ukształtowane pod zmiennymi kątami, które poprawiają spływ wióra. Specjalnie ukształtowane karby, wykonane na powierzchni natarcia, spełniają rolę łamaczy wiórów. W celu poprawy efektywności łamania wióra oprawki wyposaża się w kanały chłodzące lub dysze skierowane w ten sposób, aby dodatkowo wspomagały proces łamania i ewakuacji wiórów ze strefy obróbki [11, 12].

Ważny element geometrii noża tokarskiego stanowi naroże. Im większy jest promień naroża r_ϵ tym większa siła generowana jest podczas obróbki. Jednocze-

śnie należy uwzględnić, że zmniejszenie promienia naroża przy tej samej prędkości posuwu v_f powoduje pogorszenie chropowatości powierzchni obrabianej. Właściwy dobór promienia naroża gwarantuje stabilność procesu obróbki, wpływa na dokładność wytwarzanych przedmiotów i chropowatość obrabianej powierzchni.

W celu zapobiegania powstawaniu narostu, powierzchnię natarcia dodatkowo szlifuje się tak, aby zmniejszyć oddziaływanie adhezyjnego przylegania materiału. W przypadku geometrii narzędzi dedykowanych do obróbki wykończeniowej częstą przyczyną zniszczenia krawędzi skrawającej jest odłamanie wraz z narostem krawędzi skrawającej lub uszkodzenie powłoki [11, 12, 14].

Podczas frezowania stopów aluminium zaleca się stosowanie narzędzi monolitycznych z węglików spiekanych. Główną grupę frezów stanowią narzędzia niepokrywane. W przypadku obróbki stopów o zwiększonej zawartości krzemu stosuje się powłoki PKD, mające na celu zwiększenie odporności na ścieranie. W celu zmniejszenia drgań stosuje się podziałkę ostrzy nierównomierną i zmienny kąt wzniosu linii śrubowej. Obróbkę wykończeniową realizuje się poprzez zastosowanie krawędzi z polikrystalicznego diamentu (PKD). Frezy posiadają ostrze centralne w celu możliwości realizacji obróbki wgłębnej oraz, w przypadku obróbki zgrubnej, dodatkowe łamacze na głównej krawędzi skrawającej. W celu osiągnięcia małej chropowatości powierzchni stosuje się frezy składane z płytkami dogładzającymi. Płytki te można stosować w konwencjonalnych narzędziach składanych. Zastosowanie takich płytek powoduje możliwość zwiększenia posuwu na ostrze bez pogorszenia jakości powierzchni.

Do obróbki zgrubnej stosuje się frezy z dodatkowymi łamaczami wiórów na głównej powierzchni natarcia. W przypadku frezów o większych średnicach niż $d = 25$ mm stosowane są narzędzia składane, które powinny posiadać szlifowaną powierzchnię natarcia wraz z rowkami wiórowymi, co umożliwia lepszą ewakuację wiórów ze strefy skrawania. Zalecane jest stosowanie małych kątów ostrza i ostrych krawędzi skrawających. Należy jednak pamiętać, że wiąże się to z obniżeniem wytrzymałości udarowej ostrza z powodu zmniejszenia jego przekroju. Zaleca się, aby pierwszym zastosowaniem narzędzi składanych była obróbka zgrubna i wysokowydajna. Do obróbki wysokowydajnej zaleca się wykorzystanie frezów wielopłytkowych o dużej średnicy i ilości płytek, przekraczających nawet 50 sztuk na jeden frez, co znacznie skraca czas obróbki, wymaga jednak bardzo dużej mocy maszyny technologicznej [11, 12].

Stosunkowo nowym rozwiązaniem są narzędzia składane do frezowania z dużymi posuwami. Narzędzia te to zazwyczaj frezy, wyposażone w płytki okrągłe lub wielokrawędziowe zbliżone geometrią do okręgu. Głębokość skrawania oscyluje zazwyczaj w granicach $a_p = (0,5 - 2,5)$ mm, natomiast posuw na ostrze w zakresie $f_z = (0,5 - 1,1)$ mm/ostrze. Płytki posiadają nawet do 16 krawędzi skrawających. Jednym narzędziem realizuje się obróbkę zgrubną i wykończeniową. Duży posuw na ostrze zapewnia dużą prędkość posuwu i dużą wydajność procesu obróbki. Dzięki

konstrukcji i odpowiedniej geometrii płytek, siły skrawania kierowane są wzdłuż osi wrzeciona, co podnosi stabilność, redukuje vibracje i zwiększa trwałość narzędzia. Geometria tych narzędzi i zalecane parametry skrawania powodują, że zapotrzebowanie na moc jest mniejsze niż w przypadku narzędzi jednolitych.



Rys. 6.7. Głowica do obróbki z dużymi posuwami

Alternatywę dla zgrubnej obróbki wydajnościowej stanowi frezowanie wglębne, tzw. *plunge-milling*. W frezowaniu wglębnym obróbka prowadzona jest czołem narzędzia zamiast obwodem, co powoduje korzystną zmianę sił z dominujących promieniowych na osiowe. Stosuje się ją na obrabiarkach o małej mocy i małym momencie na wrzecionie. Cechą charakterystyczną narzędzi do obróbki wglębnej są ostrza umieszczone centralnie w osi frezu, które umożliwiają obróbkę praktycznie w pionie z niewielką interpolacją kołowo-śrubową. Z powodzeniem mogą być one stosowane również do zgrubnego wiercenia. Zaleca się stosowanie tego rodzaju frezowania w zamian za narzędzia o dużym wysięgu.

W procesie wiercenia stopów aluminium i magnezu głównym problemem jest skuteczne łamanie i usuwanie wiórów ze strefy skrawania. Dlatego zaleca się stosowanie wiertel pełnowęglkowych o polerowanych powierzchniach rowków wiórowych i korygowanej powierzchni przyłożenia. Usuwanie wiórów odbywa się poprzez stosowanie strategii wyrzucania wiórów. W czasie obróbki wiertło zagłębia się o zadaną wartość a następnie wysuwa do powierzchni, łamiąc i wyrzucając wióry. W celu poprawy ewakuacji wiórów w narzędziach wykonuje się kanały chłodzenia przez narzędzie. Obróbkę wykończeniową płytkich otworów wykonu-

je się frezem, rozwiertakiem lub wytaczakiem. Dla większych średnic, zazwyczaj $d > 25$ mm, stosuje się wiertła składane. W celu zmniejszenia sił skrawania i możliwości łamania wiórów zaleca się wiertła z dwoma płytkami skrawającymi, rozmieszczonymi w następujący sposób: pierwsza – umieszczona centralnie – pracuje jako ścin, druga – na zewnętrznej średnicy oprawki. Takie rozwiązanie pozwala na skuteczne łamanie i odprowadzanie wiórów. Umożliwia ono wiercenie w pełnym materiale bez potrzeby stosowania strategii wyrzucania wiórów. Zmniejsza siły skrawania, a przez niesymetryczne umieszczenie płytek zapewnia większą stabilność i zmniejsza drgania.

Literatura

1. Agustina B., Rubio, E. M., *Analysis of cutting forces during dry turning processes of UNS A92024-T3 aluminium bars*. AIP Conference Proceedings. 4/30/2012, Vol. 1431 Issue 1, 360-365.
2. Altintas Y., *Analytical Prediction of Three Dimensional Chatter Stability in Milling*. JSME International Journal 44 (2001), 717 ÷ 723.
3. Andrae P., *High-Efficiency Machining*. Manufacturing Engineering 125 (2000) 4, 82 ÷ 96.
4. Burek J., Płodzień M., *Wysokowydajna obróbka części ze stopów aluminium o złożonych kształtach*. Mechanik Nr 7/2012, s. 542-549.
5. Feld M., *Obróbka skrawaniem stopów aluminium*, WNT Warszawa 1984.
6. Feng L., *Experimental and numerical study of cutting forces and temperature fields when dry turning aluminum alloy*. Key Engineering Materials, 2009, 407-408:465-468.
7. Grzesik W., *Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych*. WNT Warszawa 2010.
8. Groppe M., *Optimierung der Hochleistungszerspannung von Aluminium – Strukturbauteilen. Begleitband zum Seminar „Neue Fertigungstechnologien für die Luft- und Raumfahrt*. Hannover 2005.
9. Gsanger D., *Chancen und Grenzen des High Performance Cutting*. Werkzeug Technik 72 (2002), 35 ÷ 37.
10. Kunxian Q., Sheng Q., Chunxin G., Ming Ch., *A Study of High-performance Drills in The Drilling of Aluminum Alloy and Titanium Alloy*. Key Engineering Materials, 2014, Vol. 589/590, 163-167.
11. Oczóś K.E., *Doskonalenie procesów kształtowania ubytkowego stopów aluminium*. Mechanik 3, 4/2009, 153 ÷ 163, 249 ÷ 256.
12. Oczóś K.E., *Obróbka wysokowydajna – HPC*. Mechanik 11/2004, s. 701 ÷ 709.
13. Salguero J., Bbatista M., Calmaz M., Girot F.; Marcos M., *Cutting Forces Parametric Model for the Dry High Speed Contour Milling of Aerospace Aluminium Alloys*. Procedia Engineering, Sep2013, Vol. 63, 735-742,

14. Qiu J., Ma X., Lin J., Tong J., Li X., Zhonguo JG., *Experimental study of cutting forces on high speed milling aluminum alloy using carbide end mill*. China Mechanical Engineering, 10 July 2012, 23(13):1555-1560.
15. Wang Y., Cui X., Xu H., Jiang K., *Cutting force analysis in reaming of ZL102 aluminium cast alloys by PCD reamer*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Jul2013, Vol. 67 Issue 5-8, p1509-1516. 8p.
16. Yousefi R., Ichida Y., *A study on ultra-high-speed cutting of aluminum alloy; Formation of welded metal on the secondary cutting edge of the tool and its effects on the quality of finished surface*. Precision Engineering 24 (2000), 371 ÷ 376
17. Zaleski.K., Pałka T., *Wpływ geometrii ostrza na siły skrawania podczas frezowania stopów aluminium*. Mechanik 8-9/2014, 639-646,
18. Zaleski.K., Pałka T., „Wpływ minimalnego smarowania na chropowatość powierzchni stopów magnezu po frezowaniu”, Mechanik 8-9/2012, 439-446,
19. PN-EN 573-3 Aluminium i stopy aluminium.

7. Właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej stopów aluminium i magnezu po obróbce skrawaniem

Wstęp

Ciągły postęp technologiczny zmusza producentów części maszyn oraz narzędzi skrawających do poszukiwania bardziej wydajnych i efektywnych metod ich wytwarzania [1, 3, 5, 7]. Względy ekonomiczne oraz wymogi ekologiczne powodują konieczność wprowadzania nowych rozwiązań, zapewniających zmniejszenie jednostkowych kosztów wytwarzania przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniej jakości wytworzonych części maszyn.

Poprawa efektywności obróbki [2, 6, 10], w tym także rozwój wysokowydajnych i szybkościowych metod skrawania, powodują także wzrost wymagań stawianych narzędziom skrawającym. Podstawowym wyznacznikiem o przydatności danego narzędzia do obróbki jest zapewnienie odpowiedniej jakości warstwy wierzchniej po obróbce. Ciągłe wzrastająca dokładność obróbki frezowaniem powoduje, że coraz częściej powierzchnie obrobione w ten sposób nie podlegają dalszemu kształtowaniu [11, 15, 16, 18]. Często stan powierzchni po tej obróbce jest ostateczny i wpływa bezpośrednio na właściwości eksploatacyjne. Zastosowanie wysokoobrotowych obrabiarek CNC do obróbki skrawaniem zapewnia uzyskanie powierzchni o odpowiedniej dokładności geometrycznej i pozwala wyeliminować w niektórych przypadkach operacje szlifowania z typowych procesów technologicznych części maszyn. Ma to znaczenie praktyczne, wynikające ze skrócenia czasu potrzebnego do wykonania końcowego produktu, a więc obniżenie kosztów produkcyjnych.

Główni producenci narzędzi skrawających bardzo szybko reagują na potrzeby rynku wprowadzając coraz nowsze rozwiązania konstrukcyjne, z reguły będące tajemnicą firmy. Ciągły rozwój materiałów narzędziowych, geometrii ostrza (płytki narzędziowe), a także ciągła optymalizacja powłok stosowanych na narzędzia powodują poprawę jakości warstwy wierzchniej jaką uzyskujemy po obróbce skrawaniem [17, 19, 20, 22].

Warstwa wierzchnia w odróżnieniu do powierzchni ma różną grubość i jest zależna od wielu cech fizycznych i chemicznych danego materiału konstrukcyjne-

go. Grubość ta może wynosić od rozmiarów rzędu pojedynczej lub kilku warstw atomowych do kilku czy kilkudziesięciu mikrometrów, a nawet więcej. Natomiast powierzchnia w sensie fizycznym jest jednym z podstawowych pojęć geometrii, definiowana jako zbiór punktów lub prostych, a zatem nie posiada grubości. W literaturze występuje definicja powierzchni, określona w sposób stosowany w analizie inżynierii powierzchni, jako warstwa o grubości od 1 do 4 zewnętrznych warstw atomowych. Stosuje się również określenie warstwa powierzchniowa lub warstwa przypowierzchniowa [3].

Właściwości fizyczne warstwy wierzchniej są istotne ze względu na stabilność procesu technologicznego oraz cech eksploatacyjnych wyrobu. Badania stanu energetycznego warstwy wierzchniej stopów aluminium i magnezu, stosowanych między innymi w przemyśle lotniczym, po obróbce frezowaniem, są niezmiernie istotne w takich zastosowaniach, w których występuje zjawisko adhezji. Technologie, w których zjawisko adhezji jest wykorzystywane, to m.in.: nanoszenie różnego rodzaju powłok adhezyjnych, klejenie, uszczelnianie i inne. Bardzo ważnym etapem wykonania połączeń adhezyjnych jest odpowiednie przygotowanie warstwy wierzchniej materiałów łączonych. Praktyczne znaczenie w inżynierii powierzchni mają badania stanu energetycznego warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych. Od kilkudziesięciu lat są one obiektem zainteresowań wielu dyscyplin naukowych, takich jak: fizyka, chemia, inżynieria materiałowa oraz w ostatnich latach także biotechnologia.

Stopy aluminium i magnezu są dość łatwo obrabialne i z powodzeniem można kształtować je procesami obróbki skrawaniem z dużymi prędkościami (HSC) [21, 23]. Jednym z głównych problemów przy frezowaniu stopów aluminium jest łamanie wiórów, dlatego stosuje się duże wartości kątów natarcia oraz odpowiednie zwijacze lub łamacze wióra. Narzędzia przeznaczone do obróbki frezowaniem stopów aluminium mają mniejszą liczbę ostrzy skrawających w celu zwiększenia przestrzeni wiórowych. Trwałość narzędzi można zwiększyć poprzez zastosowanie powłok na powierzchniach roboczych.

Coraz częściej mówi się o prowadzeniu obróbki skrawaniem w otoczeniu mgły cieczy chłodząco smarującej MQL (Minimum Quantity Lubrication). Prowadząc obróbkę w warunkach MQL niezmiernie istotne jest odpowiednie kształtowanie stanu energetycznego warstwy wierzchniej w strefie skrawania obrabianych materiałów. Ważne jest, aby rozproszona ciecz w powietrzu (aerazol) użyta podczas obróbki została dostarczona do strefy skrawania i pozostała możliwie długo w tej strefie. Ze względu na fakt, że stan energetyczny warstwy wierzchniej jest ważnym czynnikiem, decydującym o efektywności takich technologii jak klejenie, uszczelnianie, malowanie, prowadzono odpowiednie badania dla stopów aluminium oraz magnezu stosowanych w przemyśle lotniczym. Badania te prowadzono po obróbce frezowaniem w warunkach uznanych za konwencjonalne (przyjęta w badaniach prędkość skrawania $v_c = 200$ m/min) oraz po obróbce HSM (prędkość skrawania

$v_c - 1200 \text{ m/min}$). Określenie wartości swobodnej energii powierzchniowej badanych materiałów odbywa się pośrednio, na podstawie wyników pomiarów kąta zwilżania odpowiednimi cieczami pomiarowymi.

7.1. Metody określania swobodnej energii powierzchniowej (SEP)

Z obecnego stanu wiedzy z nauk podstawowych takich jak fizyka, chemia oraz nauk pokrewnych wiemy, że w obszarach międzyfazowych atomy wchodzące w skład każdej z faz podlegają działaniu innego układu sił niż atomy znajdujące się w głębi fazy. Występują następujące układy fazowe: ciało stałe – ciecz, ciało stałe – gaz, ciecz – gaz [14]. Atomy znajdujące się wewnątrz danej fazy są otoczone atomami tego samego rodzaju, a zatem poddane są działaniu zrównoważonego układu sił przyciągania oraz odpychania. Natomiast atomy, które znajdują się w obszarze międzyfazowym lub na granicy faz podlegają innemu rozkładowi sił. Z jednej strony są one przyciągane przez sąsiednie atomy rodzimej fazy, a z drugiej strony są przyciągane przez atomy z fazy sąsiedniej. Taki układ można określić jako asymetryczne pole sił. W przypadku, kiedy siły przyciągania w kierunku jednej z faz są odpowiednio duże, atomy migrują w głąb tej fazy, tak długo, dopóki nie osiągną stanu równowagi.

Swobodna energia powierzchniowa jest równa liczbowo pracy potrzebnej do utworzenia nowej jednostki powierzchni, podczas rozdziału dwóch znajdujących się w równowadze faz, w odwracalnym procesie izotermicznym [14]. Miarą swobodnej energii powierzchniowej jest $[\text{mJ}/\text{m}^2]$.

W badaniach naukowych oraz zastosowaniach przemysłowych występuje wiele metod wyznaczania wartości swobodnej energii powierzchniowej i wciąż są opisywane nowe metody. Dla cieczy są to metody bezpośrednie, natomiast dla ciał stałych są to metody pośrednie, bazujące przede wszystkim na pomiarze wartości kąta zwilżania cieczami pomiarowymi [14]. Można wymienić następujące metody wyznaczenia wartości swobodnej energii powierzchniowej: metodę Fowkesa, Owensa-Wendta, van Ossa-Chaudhury'ego-Gooda, Zismana, Neumanna, Wu, metodę opartą na pomiarach histerezy kąta zwilżania, metodę cieczy wzorcowych oraz inne.

W badaniach najczęściej wykorzystuje się następujące cieczy pomiarowe: wodę destylowaną, glicerynę 99%, formamid 98%, dijdometan 99%, α -bromonaftalen 97%.

7.2. Wybrane zagadnienia z teorii adhezji

Słowo *adhezja* wywodzi się od łacińskiego słowa *adhaesio* i oznacza w dosłownym tłumaczeniu szepienie. Zjawisko adhezji jest jednym z podstawowych

zjawisk fizycznych związanych z budową materii. Współcześnie wiele dziedzin nauki takich jak: fizyka, chemia, chemia fizyczna, mechanika, termodynamika oraz nauki pokrewne, zajmuje się i próbuje opisać w sposób uogólniony zjawisko adhezji. Procesy związane z tym zjawiskiem są różnorodne, przy współczesnym rozwoju nauki i techniki trudno jest wymienić obszar technologii, w którym zjawisko to nie występuje.

Na podstawie analizy literatury można wymienić następujące teorie adhezji: mechaniczną, adsorpcyjną, elektrostatyczną, dyfuzyjną, termodynamiczną i inne.

Mechaniczna teoria adhezji była jedną z pierwszych teorii, przedstawioną przez J.W. McBaina, analizującą zależności między wytrzymałością połączenia klejowego a chropowatością powierzchni łączonych materiałów. Według mechanicznej teorii adhezji połączenie utworzone przez klej z materiałem łączonym nie ulega dekohezji na granicy faz pod wpływem obciążeń zewnętrznych. Dekohezja następuje wewnątrz najsłabszego materiału połączenia.

Adsorpcyjna teoria adhezji została sformułowana przez L.H. Sharpe'a oraz H. Schornhorna [14]. Według tej teorii podstawą adsorpcji i adhezji jest różnica między stanem energetycznym cząsteczek na powierzchni cieczy lub ciał stałych i cząsteczek znajdujących się w głębi tych faz. Duże znaczenie w opisywanej teorii adhezji przypisuje się siłom van der Waalsa.

Elektrostatyczna teoria adhezji wykorzystuje w opisie prawa elektrostatyki. Według tej teorii, między dwoma materiałami, doprowadzonymi do bezpośredniego kontaktu, może nastąpić przepływ strumienia elektronów. Elektrostatyczna teoria adhezji na związek z teorią adsorpcyjną.

Zjawisko wzajemnej dyfuzji cząsteczek różnych materiałów doprowadzonych do kontaktu jest podstawą rozważań dyfuzyjnej teorii adhezji.

Termodynamiczna teoria adhezji obejmuje analizę swobodnej energii powierzchniowej ciała stałego oraz cieczy jak i wzajemne relacje między poszczególnymi składowymi tej energii.

7.3. Metodyka badań

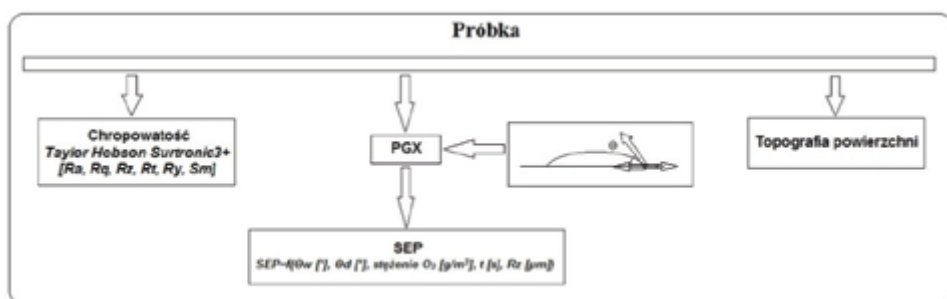
Próbki ze stopów aluminium (EN AW 7075, EN AW 7075 T651, AlSi10Mg) oraz magnezu (AZ 31 oraz AZ 91HP) wykonano na pionowym centrum obróbkowym VMC 800 HS wyposażonym w sterowanie Heidenhain iTNC 530. Podczas obróbki wykorzystano frez pełnowęglkowy (gat. węgliku H10) oraz frez z płytami diamentowymi. W tabeli 7.1 przedstawiono charakterystykę narzędzi oraz parametry obróbki z jakimi zostało przeprowadzone frezowanie.

Tabela 7.1. Narzędzia oraz parametry technologiczne obróbki

Narzędzie	Frez pełnowęglkowy	Frez z płytkami diamentowymi
Średnica D_c , mm	16	
Liczba ostrzy z	3	
Prędkość obrotowa n , obr/min.	3979	23873
Prędkość skrawania v_c , m/min	200	1200
Głębokość skrawania a_p , mm	1	
Posuw na ostrze f_z , mm/ostrze	0,01	
Prędkość posuwu v_f , mm/min.	119	716
Szerokość frezowania a_e mm	15	

Wszystkie próbki wykonane ze stopów aluminium oraz magnezu były poddane obróbce frezowaniem bez użycia chłodziwa oraz z użyciem chłodziwa MobilCut 222.

Na rysunku 7.1 przedstawiono schemat blokowy przeprowadzonych podczas badań pomiarów.



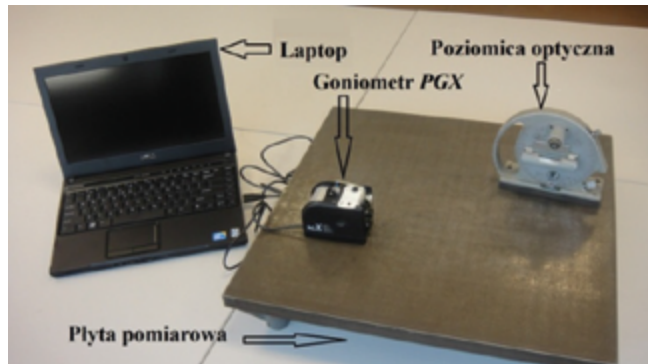
Rys. 7.1. Schemat blokowy przeprowadzonych pomiarów

Pomiar chropowatości zrealizowano za pomocą profilografometru firmy Taylor – Hobson Surtronic 3+ oraz oprogramowania TalyProfile Lite. Pomiaru chropowatości dokonywano w kierunku prostopadłym do śladów obróbki minimum 8 razy na każdej z badanych powierzchni a następnie wartości parametru R_a uśredniono i przedstawiono na wykresach. Długość odcinka elementarnego przyjęto wg tabel [9] na poziomie $L_c = 0,8\text{mm}$.

Ciecze pomiarowe (woda destylowana, diiodometan), służące do pomiaru kątów zwilżania na badanych powierzchniach, o stałej objętości $4\ \mu\text{l}$, наносzono w sposób automatyczny przez mechanizm goniometru PGX. Pomiaru kąta zwilżania badanych próbek odbywały się na płycie pomiarowej, której poziom był spraw-

dzany poziomą optyczną w temperaturze otoczenia wynoszącej (29-21)°C i wilgotności względnej (32-45)%. Na badanych powierzchniach wykonano minimum po 10 pomiarów kąta zwilżania zarówno wodą destylowaną jak i diiodometanem.

Na rysunku 7.2 przedstawiono stanowisko do pomiarów kątów zwilżania oraz wyznaczania wartości swobodnej energii powierzchniowej.



Rys. 7.2. Stanowisko do pomiarów kątów zwilżania

Stanowisko pomiarowe składa się z: płyty pomiarowej na której znajdowały się badane próbki, poziomicy optycznej służącej do sprawdzenia poziomu płyty, goniometru PGX za pomocą którego dokonywano pomiarów kątów zwilżania, komputera wraz z oprogramowaniem.

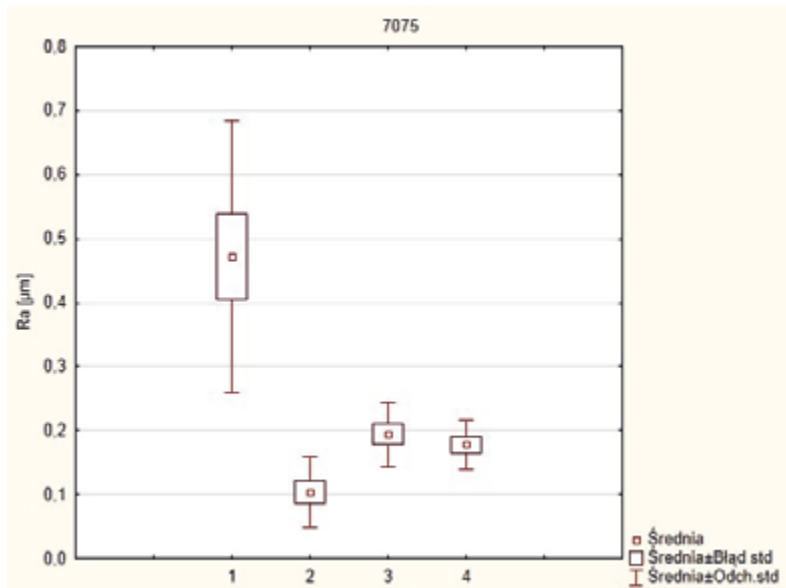
7.4. Wyniki badań

Jednym z podstawowych parametrów opisujących powierzchnię, a w zasadzie warstwę wierzchnią jest chropowatość powierzchni. Za pomocą profilografometru firmy Taylor – Hobson Surtronic 3+ możemy dokonać pomiaru następujących parametrów chropowatości: Ra [μm], Rq [μm], Rz [μm], Rt [μm], Ry [μm], Sm [μm].

7.4.1. Frez pełnowęglkowy

W badaniach użyto frez pełnowęglkowy o oznaczeniu handlowym OptiMill® -Alu-HPC SCM27. Cechy geometryczne narzędzia mają znaczenie, charakter tworzenia się wióra ma bezpośredni wpływ na stan energetyczny warstwy wierzchniej.

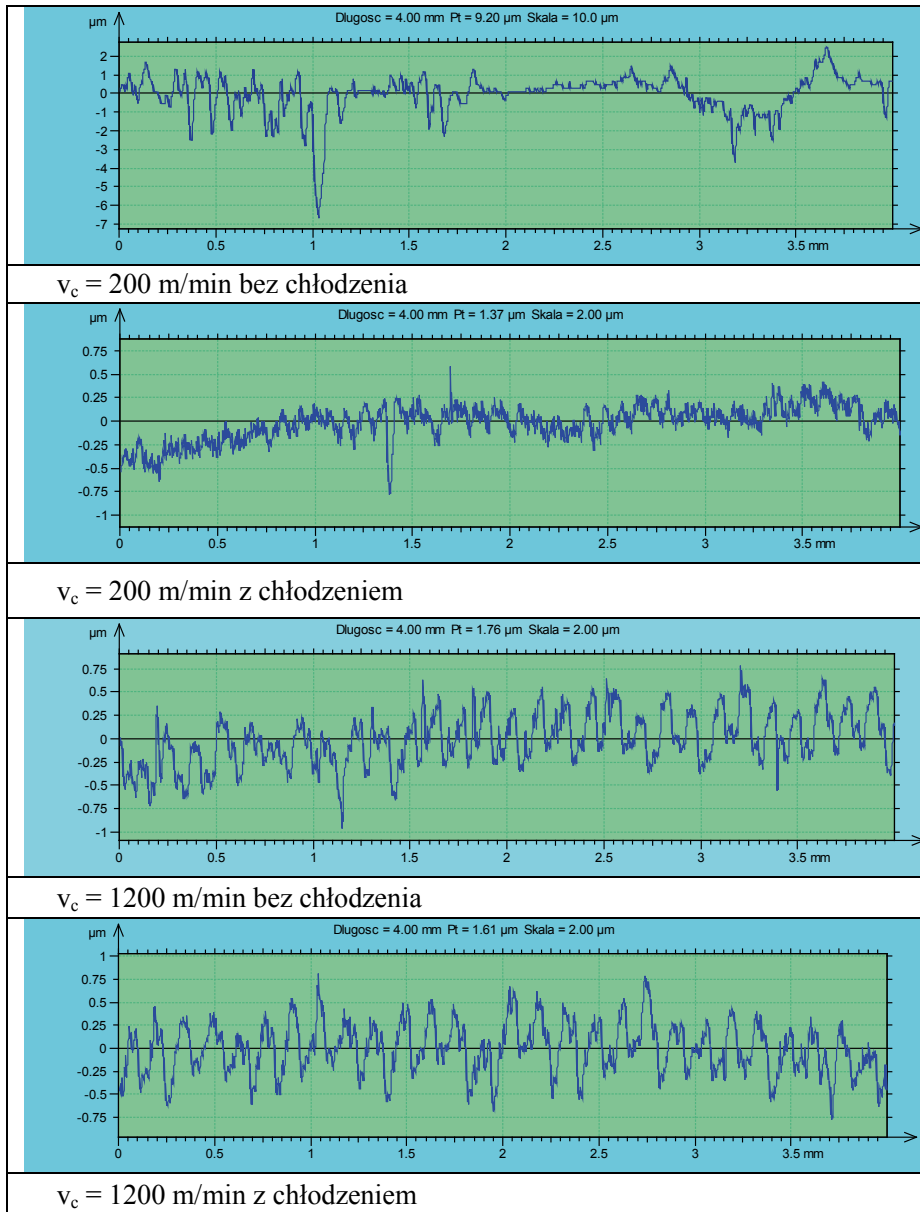
Na rysunku 7.3 przedstawiono wpływ prędkości skrawania oraz warunków chłodzenia na wartości parametru chropowatości Ra po frezowaniu stopu aluminium EN AW 7075.



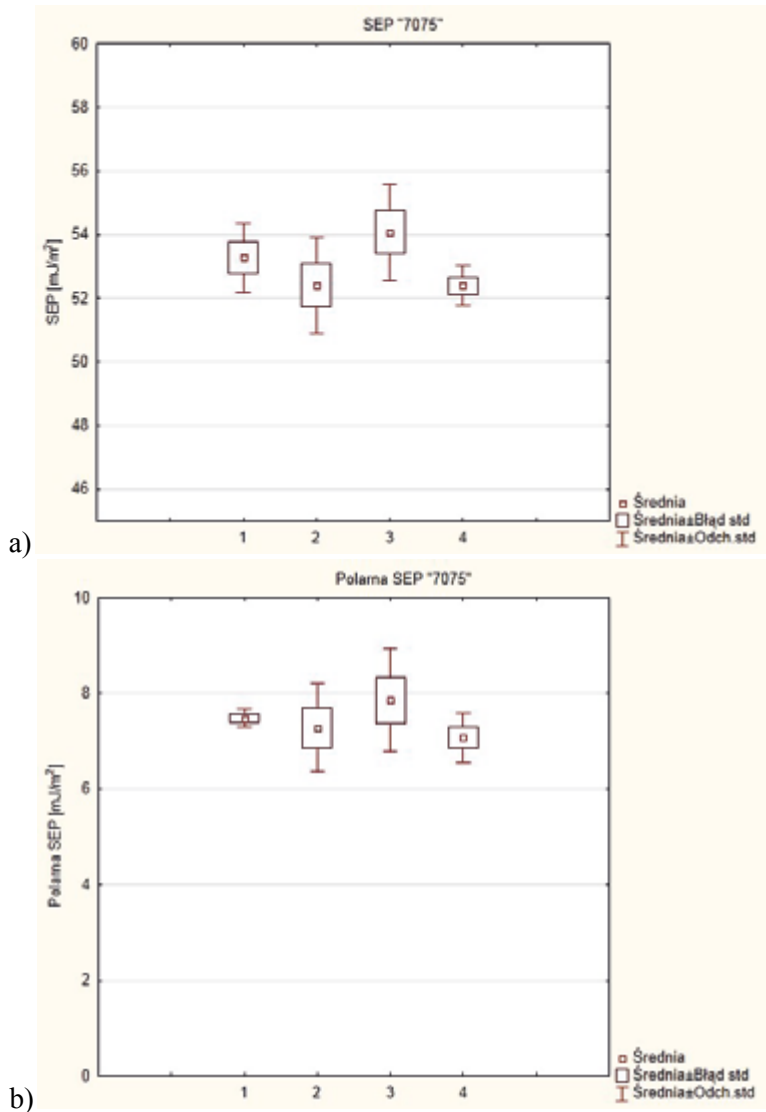
Rys. 7.3. Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartości parametru chropowatości R_a stopu aluminium EN AW 7075: 1 - $v_c = 200$ m/min bez chłodzenia, 2 - $v_c = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $v_c = 1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $v_c = 1200$ m/min z chłodzeniem

W tabeli 7.2 przedstawiono profile chropowatości dla stopu aluminium EN AW 7075. Profile opracowano w programie TalyProfile Lite. Na próbkach obrabianych z prędkością $v_c = 200$ m/min oraz $v_c = 1200$ m/min zarówno z użyciem chłodziwa jak i bez chłodziwa zaobserwowano na profilu charakterystyczne zagłębienia przedstawiające kinematyczno-geometryczne odwzorowanie narzędzia.

Tabela 7.2. Topografia powierzchni stopu aluminium EN AW 7075

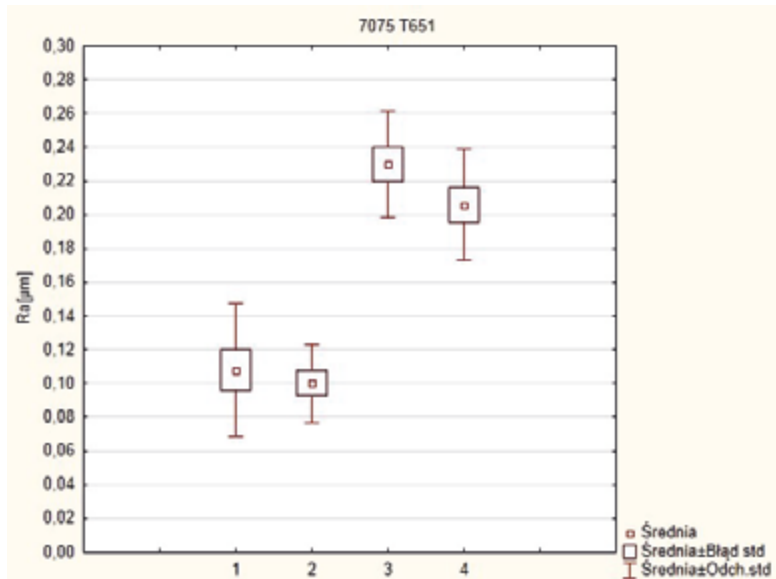


Na rysunku 7.4 przedstawiono wpływ prędkości skrawania oraz warunków chłodzenia i smarowania na wartość swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowej polarnej stopu EN AW 7075.



Rys. 7.4. Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartości: a) swobodnej energii powierzchniowej, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej, stop EN AW 7075 1 - $v_c = 200$ m/min bez chłodzenia, 2- $v_c = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $v_c = 1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $v_c = 1200$ m/min z chłodzeniem

Na rysunku 7.5 przedstawiono wpływ prędkości frezowania oraz warunków chłodzenia na wartości parametru chropowatości R_a stopu aluminium EN AW 7075 T651.

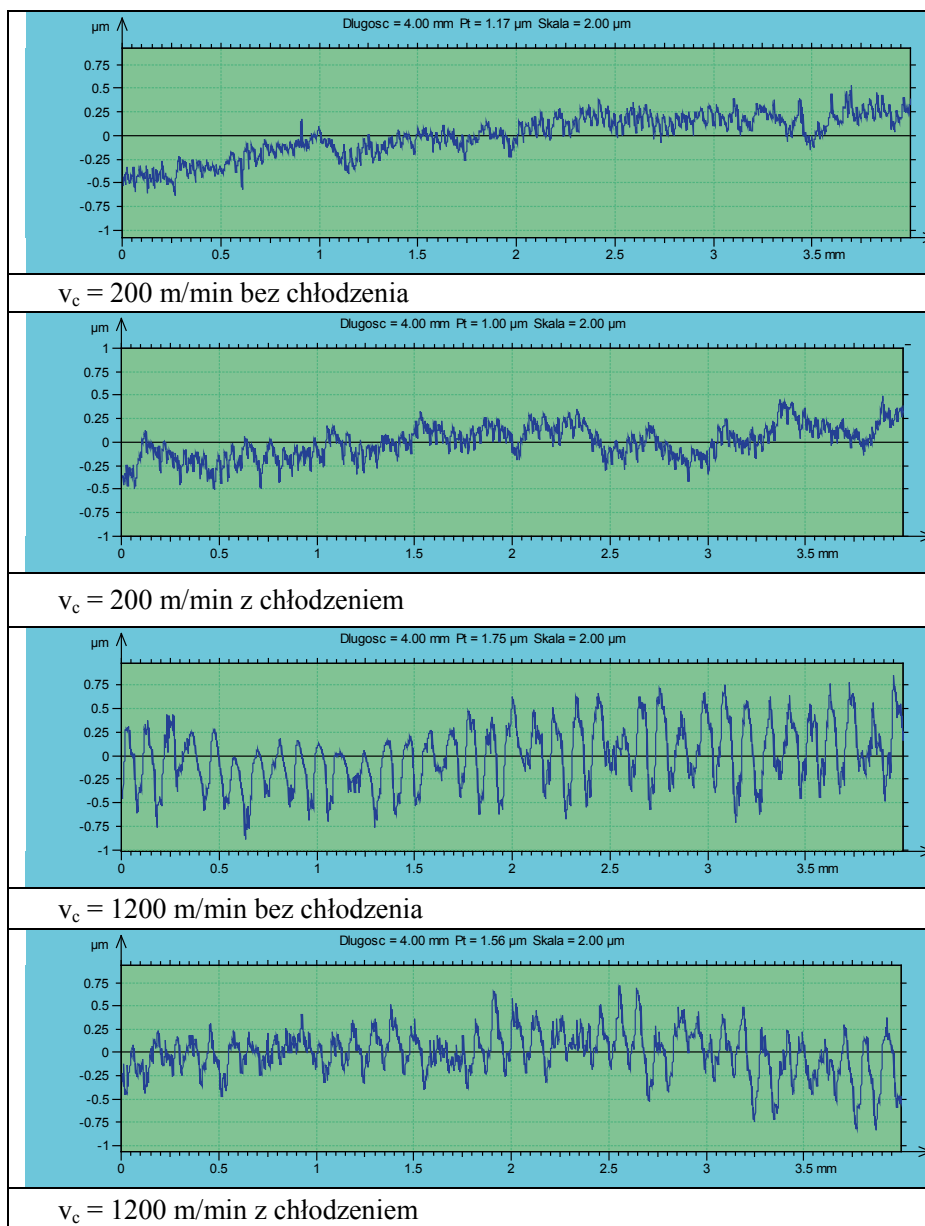


Rys. 7.5. Wpływ prędkości skrawania oraz warunków chłodzenia na wartości parametru chropowatości R_a stopu aluminium EN AW 7075 T651: 1 - $v_c = 200$ m/min bez chłodzenia, 2 - $v_c = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $v_c = 1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $v_c = 1200$ m/min z chłodzeniem

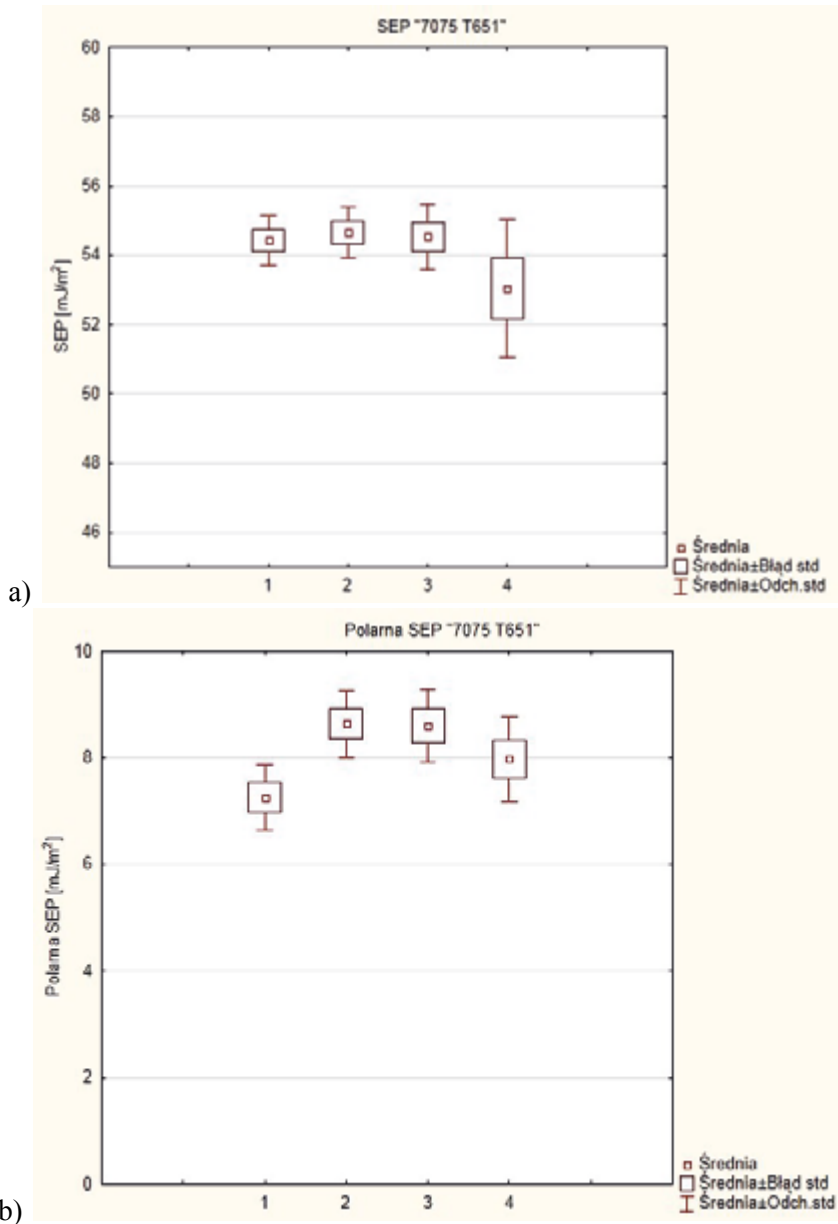
Na podstawie przeprowadzonych badań zauważono wzrost wartości parametru R_a dla powierzchni frezowanych z prędkością $v_c = 1200$ m/min. Może to być wynikiem zjawisk dynamicznych w procesie skrawania, należy jednak zauważyć, że zmiany wartości parametru R_a mieszczą się w stosunkowo małym przedziale.

W tabeli 7.3 przedstawiono profile chropowatości stopu aluminium EN AW 7075 T651. Na próbkach obrabianych z prędkością $v_c = 1200$ m/min zarówno z użyciem chłodziwa jak i bez chłodziwa również zaobserwowano na profilu charakterystyczne zagłębienia przedstawiające kinematyczno-geometryczne odwzorowanie narzędzia. Charakter profilu jest jednak inny, wyraźnie zmniejsza się amplituda rzędnych profilu. Obserwację profilu mogą dostarczyć pewnych informacji o właściwościach energetycznych warstwy wierzchniej po obróbce, nie są jednak wystarczające dla takich prognoz.

Tabela 7.3. Topografia powierzchni stopu aluminium EN AW 7075 T651

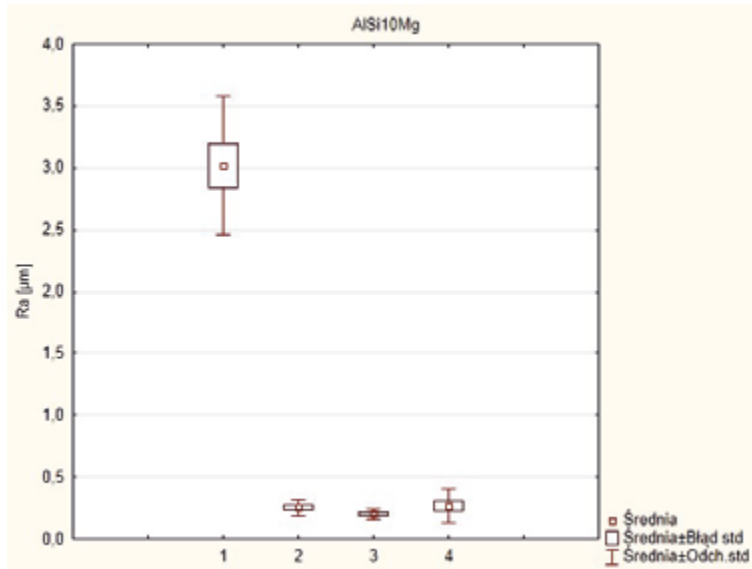


Na rysunku 7.6 przedstawiono wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartość swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowej polarnej stopu EN AW 7075 T651.



Rys. 7.6. Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartości: a) swobodnej energii powierzchniowej, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej, stop EN AW 7075 T651, 1 - $v_c = 200$ m/min bez chłodzenia, 2 - $v_c = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $v_c = 1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $v_c = 1200$ m/min z chłodzeniem

Na rysunku 7.7 przedstawiono wpływ prędkości skrawania oraz warunków chłodzenia na wartości parametru chropowatości Ra stopu aluminium AlSi10Mg.

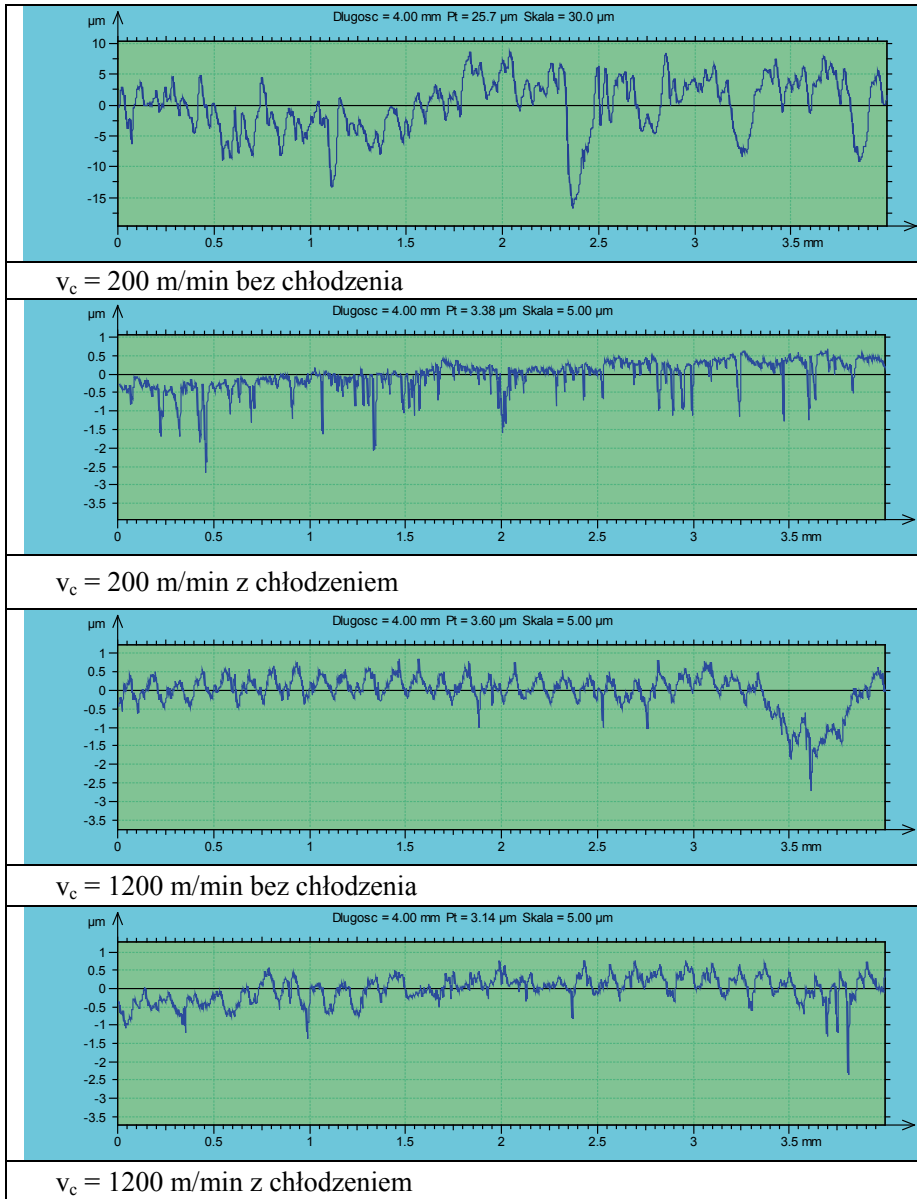


Rys. 7.7. Wpływ prędkości skrawania oraz warianu chłodzenia na wartości parametru chropowatości Ra stopu aluminium AlSi10Mg: 1 - $v_c = 200$ m/min bez chłodzenia, 2 - $v_c = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $v_c = 1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $v_c = 1200$ m/min z chłodzeniem

Na podstawie przeprowadzonych badań zauważono znaczący wzrost wartości parametru chropowatości Ra dla powierzchni stopu aluminium AlSi10Mg frezowanej z prędkością $v_c = 200$ m/min bez użycia cieczy obróbkowej w stosunku do prowadzonej obróbki z użyciem, lub bez, cieczy chłodząco – smarującej oraz z prędkością skrawania $v_c = 1200$ m/min. Warto zwrócić uwagę na fakt, że dla obróbki na sucho zaobserwowano bardzo istotne zmniejszenie chropowatości dla prędkości skrawania $v_c = 1200$ m/min w stosunku do $v_c = 200$ m/min.

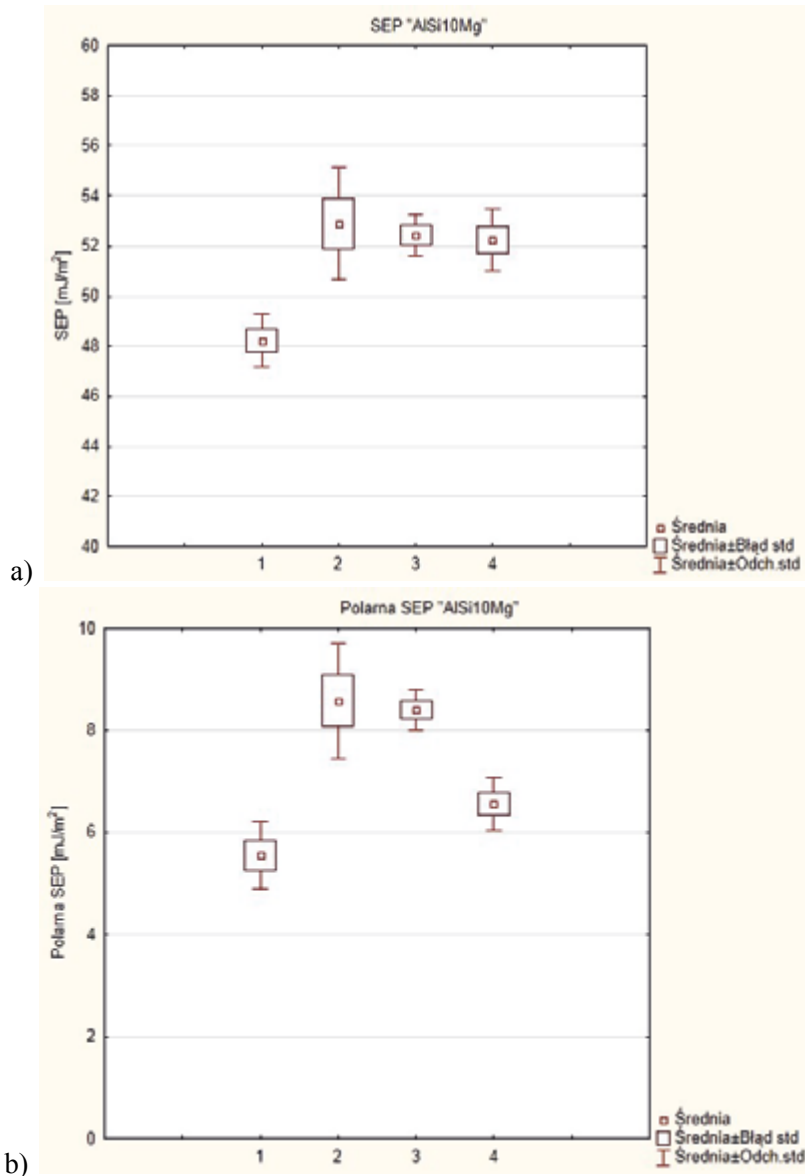
W tabeli 7.4 przedstawiono profile chropowatości przy obróbce stopu aluminium AlSi10Mg. Na próbkach obrabianych z prędkością $v_c = 1200$ m/min zarówno z użyciem chłodziwa jak i bez chłodziwa zaobserwowano na profilu charakterystyczne zagłębienia przedstawiające kinematyczno–geometryczne odwzorowanie narzędzia. Należy także zauważyć zmiany stabilności procesu przy obróbce na sucho, charakteryzują to zmiany chropowatości i ich charakter dla wariantu obróbki konwencjonalnej.

Tabela 7.4. Topografia powierzchni stopu aluminium AlSi10Mg



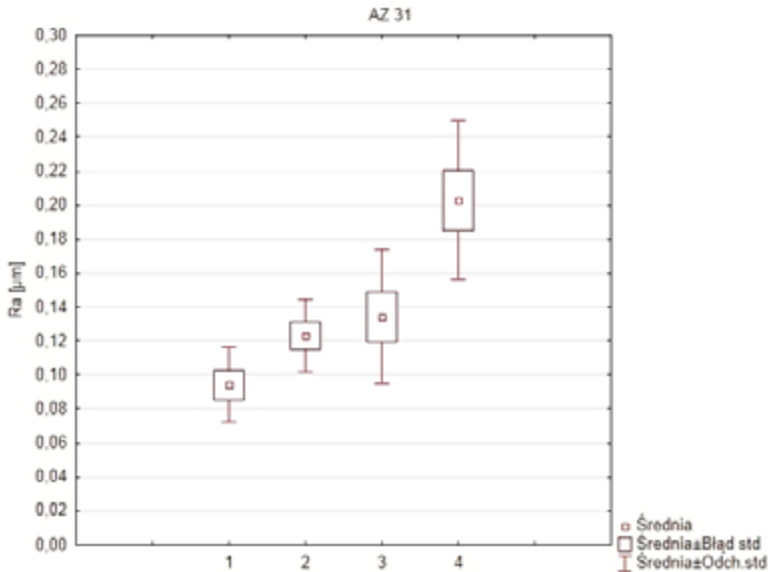
Zaobserwowane profile wskazują także na związek warunków obróbki ze stopniem i charakterem rozwinięcia geometrycznego powierzchni, jest to ważne z punktu widzenia możliwości konstytuowania stanu energetycznego warstwy wierzchniej poprzez zmiany topografii powierzchni.

Na rysunku 7.8 przedstawiono wpływ prędkości skrawania oraz warunków chłodzenia na wartość swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowej polarnej stopu AlSi10Mg.



Rys. 7.8. Wpływ prędkości skrawania oraz wariantów chłodzenia na wartości: a) swobodnej energii powierzchniowej, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej, stop AlSi10Mg; 1 - $vc=200$ m/min bez chłodzenia, 2 - $vc=200$ m/min z chłodzeniem, 3- $vc=1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $vc=1200$ m/min z chłodzeniem

Na rysunku 7.9 przedstawiono wpływ prędkości skrawania oraz warunków chłodzenia na wartości parametru chropowatości Ra stopu magnezu AZ 31.

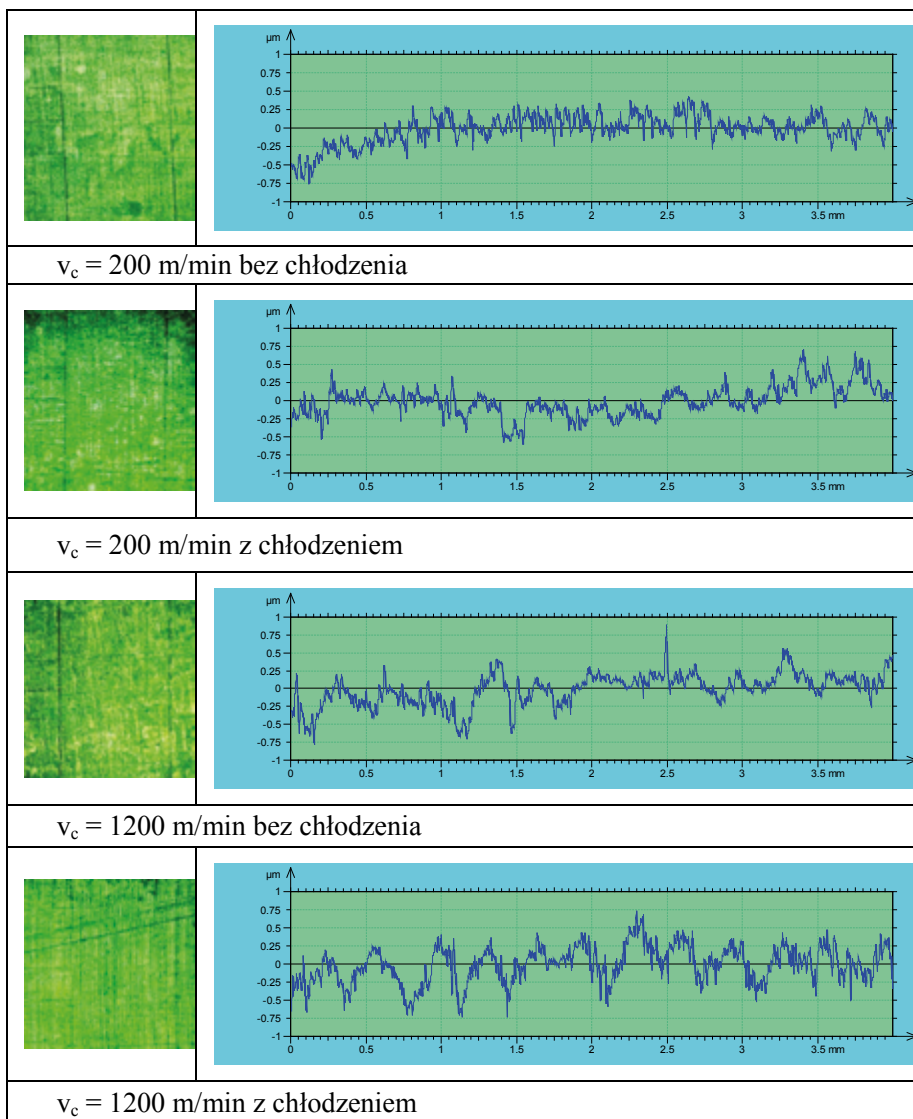


Rys. 7.9. Wpływ prędkości skrawania wariantów chłodzenia na wartości parametru chropowatości Ra stopu magnezu AZ31: 1 - $v_c = 200$ m/min bez chłodzenia, 2 - $v_c = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $v_c = 1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $v_c = 1200$ m/min z chłodzeniem

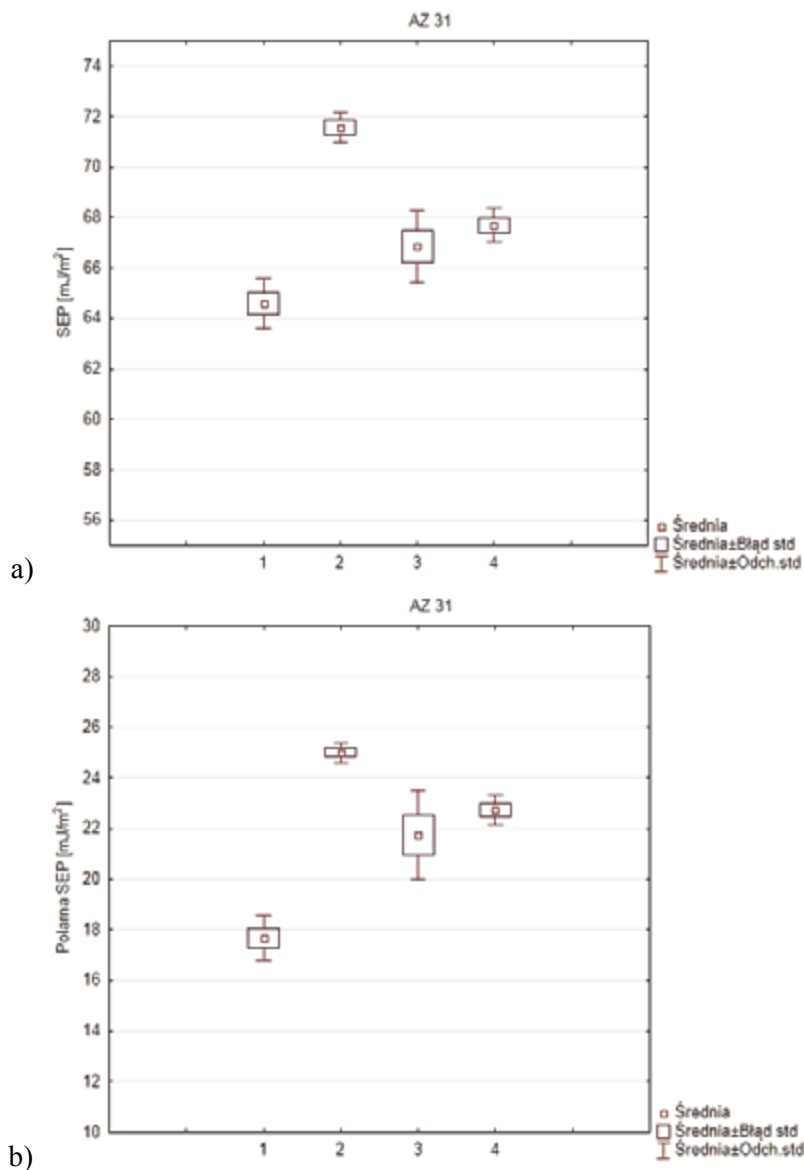
Dla stopu magnezu AZ 31 zaobserwowano nieznaczny wzrost wartości parametru chropowatości Ra dla frezowania (frezem pełnowęglkowym) z użyciem chłodziwa, z prędkością skrawania $v_c = 1200$ m/min, w porównaniu do wcześniej prowadzonej obróbki (wariant 1, 2 oraz 3 na rysunku 9).

W tabeli 7.5 przedstawiono zdjęcia topografii powierzchni stopu AZ 31 wykonane na mikroskopie z powiększeniem stukrotnym oraz zestawiono profile chropowatości. Profile opracowano w programie TalyProfile Lite. Na próbkach obrabianych z prędkością $v_c = 1200$ m/min zarówno z użyciem chłodziwa jak i bez chłodziwa zaobserwowano na profilu charakterystyczne zagłębienia przedstawiające kinematyczno-geometryczne odwzorowanie narzędzia. Dla stopu Mg zmiany w topografii powierzchni po obróbce konwencjonalnej i HSM są mniej widoczne jak w przypadku stopów Al.

Tabela 7.5. Topografia powierzchni stopu AZ 31



Na rysunku 7.10 przedstawiono wpływ prędkości skrawania oraz warunków chłodzenia na wartość swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowej polarnej stopu AZ 31.

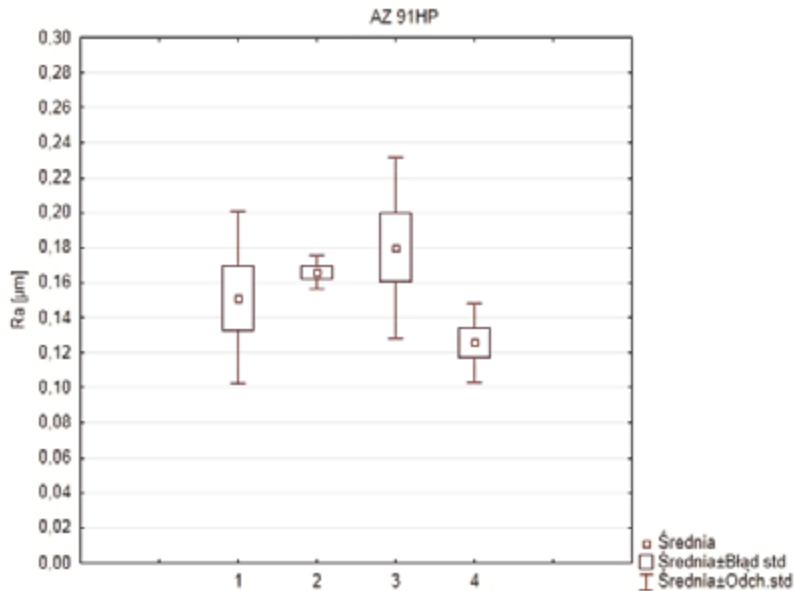


Rys. 7.10. Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartości: a) swobodnej energii powierzchniowej, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej, stop AZ 31, 1 - $vc = 200$ m/min bez chłodzenia, 2 - $vc = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $vc = 1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $vc = 1200$ m/min z chłodzeniem

Z przeprowadzonych badań wynika, że wartość swobodnej energii powierzchniowej stopu magnezu AZ 31 wzrasta dla obróbki frezowaniem prowadzonej

z udziałem cieczy chłodząco smarującej. Efekt ten jest znacznie bardziej widoczny dla obróbki przeprowadzonej z prędkością $v_c = 200$ m/min w stosunku do obróbki przeprowadzonej z prędkością skrawania $v_c = 1200$ m/min.

Na rysunku 7.11 przedstawiono wpływ prędkości skrawania oraz warunków chłodzenia na wartości parametru chropowatości R_a stopu magnezu AZ 91HP.



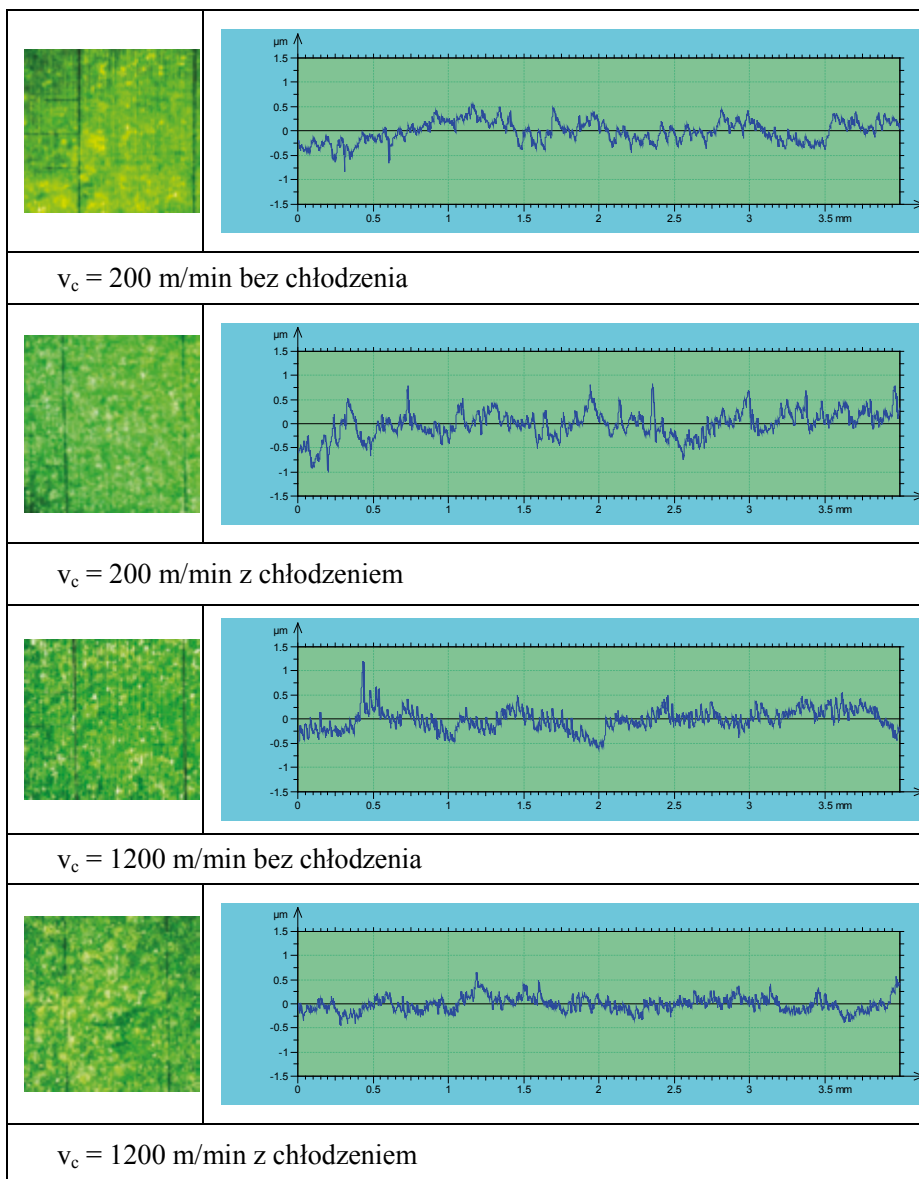
Rys. 7.11. Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartości parametru chropowatości R_a stopu magnezu AZ91HP: 1 - $v_c = 200$ m/min bez chłodzenia, 2 - $v_c = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $v_c = 1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $v_c = 1200$ m/min z chłodzeniem

Z przeprowadzonych badań wynika niewielki spadek wartości chropowatości powierzchni dla próbek poddanych obróbce z prędkością $v_c = 1200$ m/min z użyciem chłodziwa w stosunku do wariantów 1, 2 oraz 3 (rysunek 7.11).

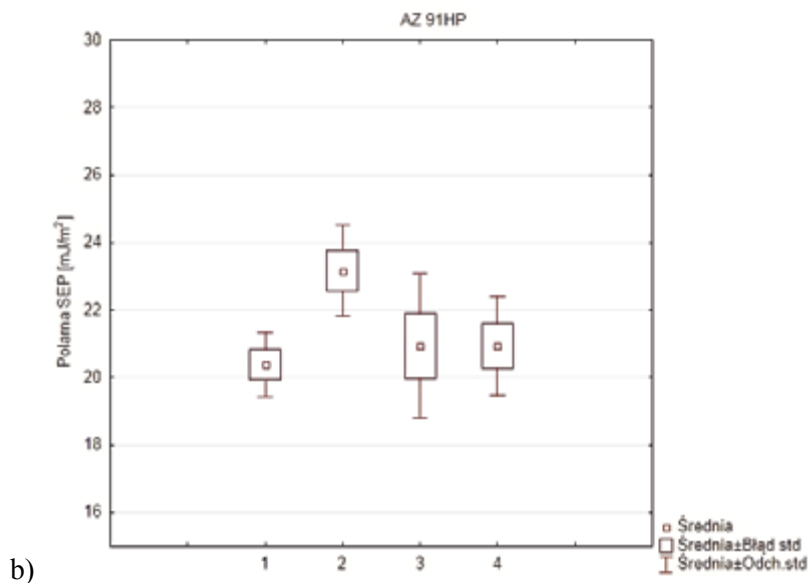
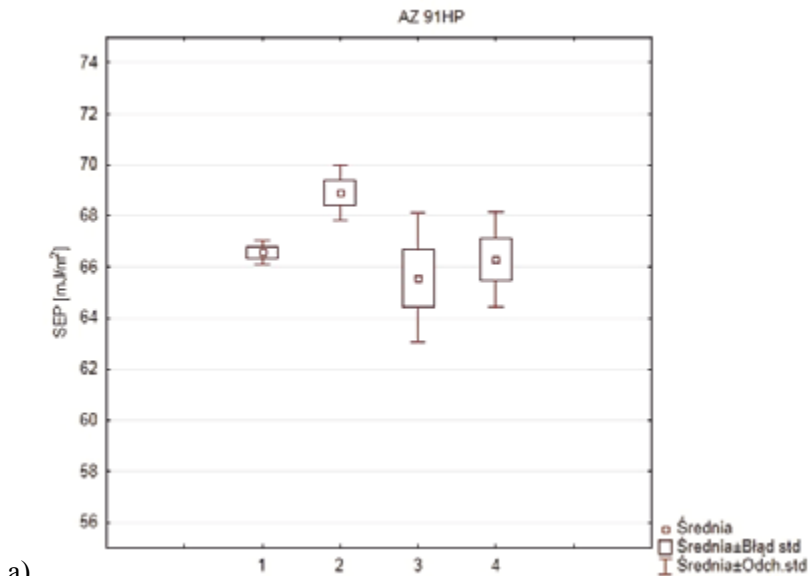
W tabeli 7.6 przedstawiono zdjęcia topografii powierzchni stopu magnezu AZ 91 HP wykonane na mikroskopie z powiększeniem stukrotnym oraz zestawiono profile chropowatości.

Obserwacje rysunków przedstawionych w tab. 7.6 mogą być bardzo pomocne w projektowaniu technologii dla elementów wykonanych ze stopów Mg w sytuacji, kiedy przewidujemy po obróbce frezowaniem takie technologie jak klejenie czy nakładanie powłok adhezyjnych. Należy podkreślić znaczenie ilości „wierzchołków” nierówności na jednostce powierzchni, stabilność cech topografii w znaczeniu makroskopowym czy też cechy „mikrogeometrii” na bocznych powierzchniach nierówności.

Tabela 7.6. Topografia powierzchni stopu AZ91HP



Na rysunku 7.12 przedstawiono wpływ prędkości skrawania oraz warunków chłodzenia na wartość swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowej polarnej stopu magnezu AZ91HP.



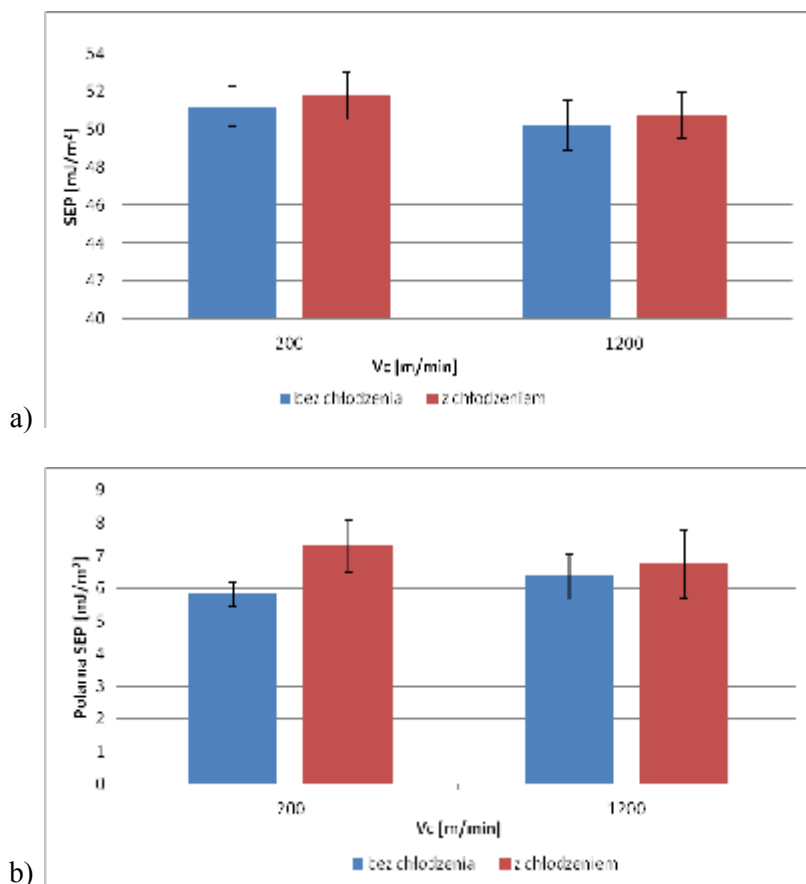
Rys. 7.12. Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartości: a) swobodnej energii powierzchniowej, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej, stop AZ 91HP; 1 - $v_c = 200$ m/min bez chłodzenia, 2 - $v_c = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $v_c=1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $v_c = 1200$ m/min z chłodzeniem

Z przeprowadzonych badań wynika, że zarówno wartość swobodnej energii powierzchniowej jak i składowa polarna SEP stopu magnezu AZ 91 HP wzrastają

dla obróbki frezowaniem prowadzonej z udziałem cieczy chłodząco smarującej. Podobnie jak przy obróbce stopu magnezu AZ 31 wzrost SEP i składowej polarnej SEP jest znacznie bardziej widoczny dla obróbki przeprowadzonej z prędkością $v_c = 200$ m/min w stosunku do obróbki przeprowadzonej z prędkością skrawania $v_c = 1200$ m/min.

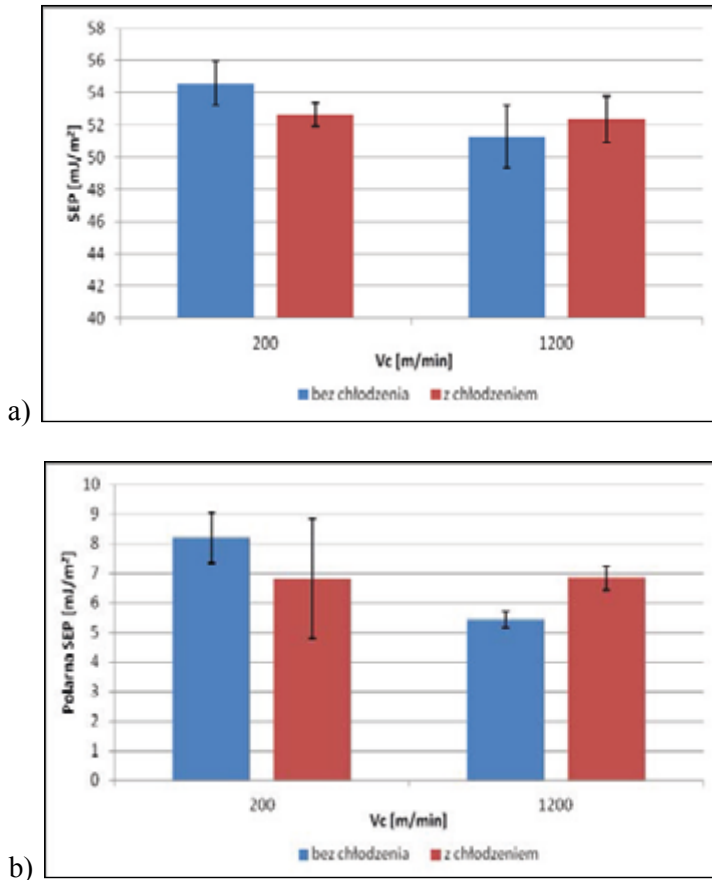
7.4.2. Frez z płytkami diamentowymi

Na rysunku 7.13 przedstawiono wpływ prędkości skrawania oraz warunków chłodzenia na wartość swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowej polarnej stopu aluminium EN AW 7075 bez obróbki cieplnej. Oznaczenie handlowe użytego frezu to: HP-EndMill typ 53.



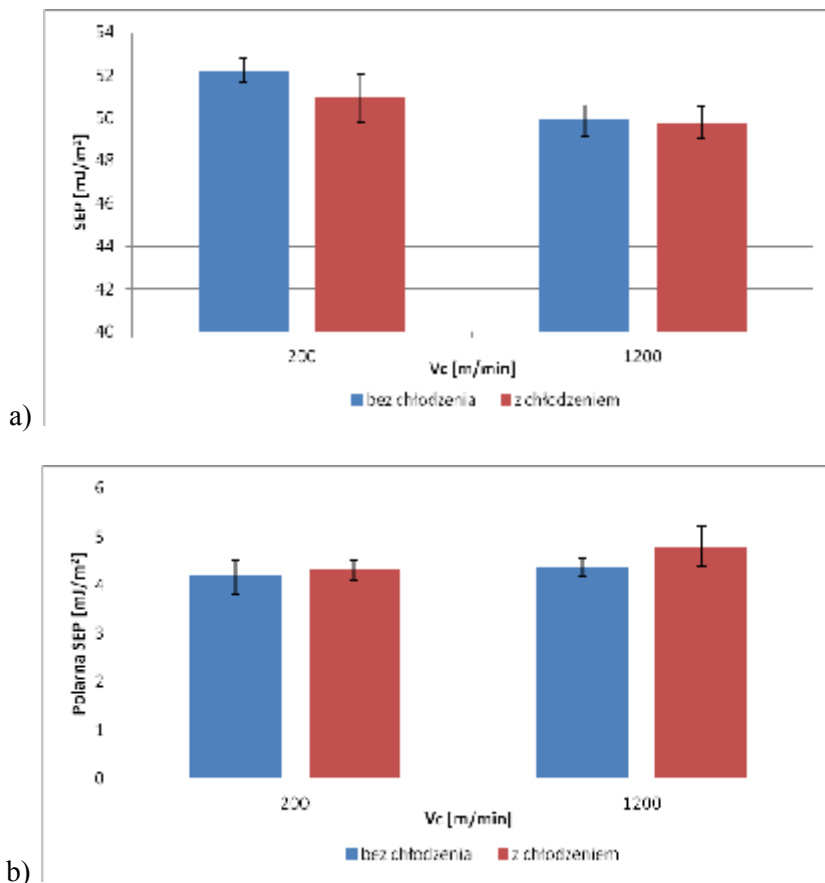
Rys. 7.13. Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartość: a) swobodnej energii powierzchniowej stopu aluminium EN AW 7075, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej stopu aluminium EN AW 7075

Na rysunku 7.14 przedstawiono wpływ prędkości skrawania oraz warunków chłodzenia na wartość swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowej polarnej stopu aluminium EN AW 7075 T651.



Rys. 7.14. Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartość: a) swobodnej energii powierzchniowej stopu aluminium EN AW 7075 T651, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej stopu aluminium EN AW 7075 T651

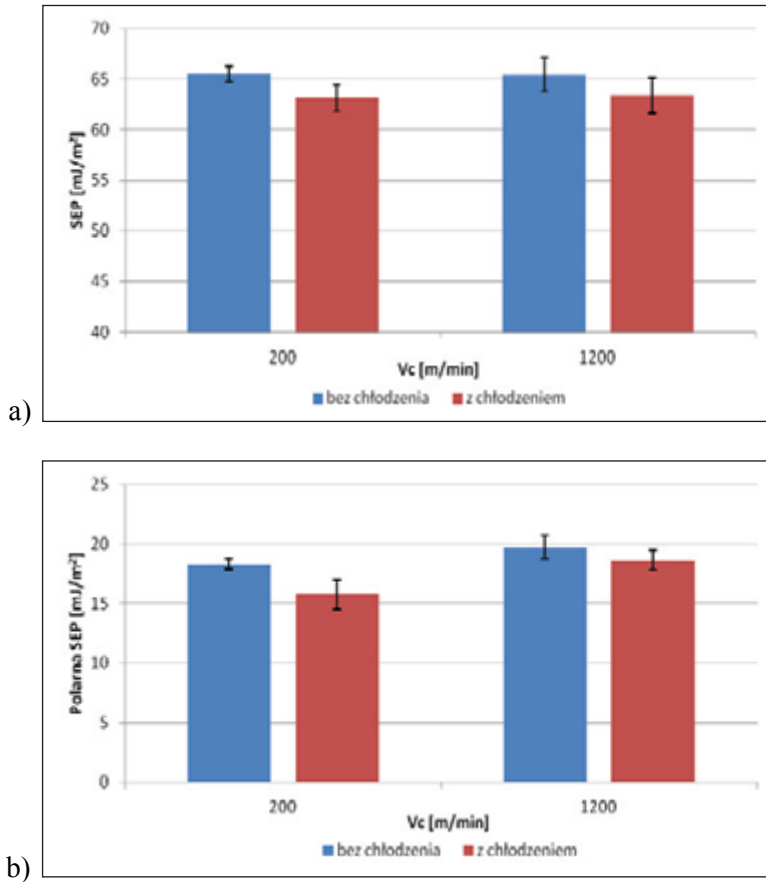
Na rysunku 7.15 przedstawiono wpływ prędkości skrawania oraz warunków chłodzenia na wartość swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowej polarnej stopu aluminium AlSi10Mg.



Rys. 7.15. Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartość: a) swobodnej energii powierzchniowej stopu aluminium AlSi10Mg, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej stopu aluminium AlSi10Mg

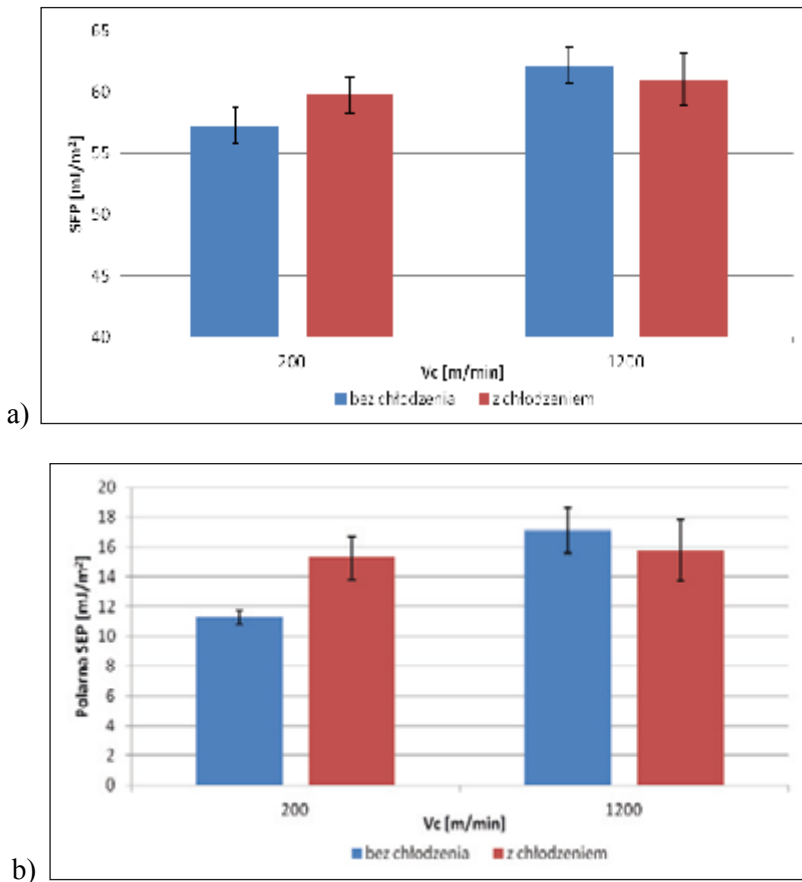
Na podstawie przeprowadzonych badań dla stopów aluminium (EN AW 7075, EN AW 7075 T651 oraz AlSi10Mg) frezowanych frezem z płytkami diamentowymi można stwierdzić spadek wartości swobodnej energii powierzchniowej dla obróbki prowadzonej z prędkością $v_c = 1200$ m/minutę w stosunku do obróbki prowadzonej z prędkością skrawania $v_c = 200$ m/min. Nie jest to jednak zjawisko o znaczącej skali. W przypadku zastosowania chłodzenia praktycznie nie obserwuje się istotnych zmian w wartości SEP uzyskanych po obróbce konwencjonalnej i HSC.

Na rysunku 7.16 przedstawiono wpływ prędkości skrawania oraz warunków chłodzenia na wartość swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowej polarnej stopu magnezu AZ 31.



Rys. 7.16. Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartość: a) swobodnej energii powierzchniowej stopu magnezu AZ 31, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej stopu magnezu AZ 31

Na rysunku 7.17 przedstawiono wpływ prędkości skrawania oraz warunków chłodzenia na wartość swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowej polarnej stopu magnezu AZ 91 HP.



Rys. 7.17. Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartość: a) swobodnej energii powierzchniowej stopu magnezu AZ 91 HP, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej stopu magnezu AZ 91 HP

Po przeprowadzonych badaniach, dla stopów magnezu można stwierdzić wzrost wartości składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej dla próbek frezowanych z prędkością $v_c = 1200$ m/min w stosunku do próbek frezowanych z prędkością skrawania $v_c = 200$ m/min. Jest to spostrzeżenie pozytywne, obróbka HSC w żaden sposób nie pogarsza właściwości adhezyjnych stopów Mg po frezowaniu.

7.5. Wnioski

1. Na podstawie przeprowadzonych badań zauważono znaczący wzrost wartości parametru chropowatości Ra dla powierzchni stopu aluminium AlSi10Mg frezowanej z prędkością $v_c = 200$ m/min (frez pełnowęglkowy) bez użycia cieczy obróbkowej w stosunku do wariantu z chłodzeniem przy prędkości skrawania $v_c = 1200$ m/min.
2. Dla stopów magnezu (AZ 31 oraz AZ 91 HP) po obróbce konwencjonalnej oraz w warunkach HSM, z użyciem chłodziwa oraz bez, nie zauważono istotnej zmiany w wartości parametru chropowatości Ra.
3. Interesujący jest znaczny wzrost wartości swobodnej energii powierzchniowej stopów magnezu (AZ 31 oraz AZ 91 HP) po obróbce frezowaniem (obróbka konwencjonalna oraz w warunkach HSM) z użyciem cieczy chłodząco smarującej w stosunku do obróbki na sucho – frez pełnowęglkowy.
4. Warto zauważyć istotny wzrost wartości swobodnej energii powierzchniowej po obróbce w obecności cieczy chłodząco-smarującej w stosunku do obróbki na sucho dla stopu AZ31 w warunkach obróbki konwencjonalnej, wzrost ten jest relatywnie znacznie większy niż w warunkach HSC – frez pełnowęglkowy.
5. Zaobserwowano wzrost wartości składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej po obróbce frezowaniem (frez pełnowęglkowy) z użyciem cieczy chłodząco smarującej w stosunku do obróbki na sucho, dotyczy to zarówno stopów Al. jak i Mg, przy czym nie jest to wzrost o istotnym znaczeniu.
6. Dla stopów aluminium (EN AW 7075, EN AW 7075 T651 oraz AlSi10Mg) frezowanych frezem z płytkami diamentowymi można stwierdzić spadek wartości swobodnej energii powierzchniowej dla obróbki prowadzonej z prędkością $v_c = 1200$ m/min w stosunku do wartości tej energii dla obróbki konwencjonalnej.
7. Dla stopów magnezu można stwierdzić wzrost wartości składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej dla próbek frezowanych z prędkością $v_c = 1200$ m/min (frez z płytkami diamentowymi) względem próbek frezowanych z prędkością $v_c = 200$ m/min. Uzyskane wartości SEP po obróbce frezowaniem stopów Mg i Al. wskazują na odpowiednie właściwości adhezyjne powierzchni do operacji klejenia, uszczelniania i innych w których zjawisko adhezji jest istotne, oznacza to możliwość pominięcia dodatkowych operacji kształtujących właściwości adhezyjne.

Przedstawione wyniki badań są fragmentem prac badawczych dotyczących możliwości zamierzonego i skutecznego kształtowania wartości SEP dla różnych materiałów konstrukcyjnych. Wyniki te są istotne w kontekście technologii klejenia, uszczelniania, malowania oraz nakładania powłok antykorozyjnych na elementach wykonanych ze stopów aluminium i magnezu w przemyśle lotniczym.

Literatura

1. Adamski W., *Wybrane kierunki zwiększania wydajności skrawania*. Mechanik nr 5-6/2009.
2. Arai M., Sato S., Ogawa M., Shikata H., *Chip control in finish cutting of magnesium alloy*. Journal of Materials Processing Technology 62 (1996) 341-344.
3. Blicharski M., *Inżynieria powierzchni*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 2009. ISBN 978-83-204-3421-7.
4. Chibowski E., Gonzalez-Caballero F., *Interpretation of contact angle hysteresis*. Journal of Adhesion Science and Technology. 11 (1993) 1195-1209.
5. Fang F., Lee L., Liu X., *Mean flank temperature measurement in high speed dry cutting of magnesium alloy*. Journal of Materials Processing Technology 167 (2005) 119-123.
6. Feld M., *Obróbka skrawaniem stopów aluminium*, Warszawa, WNT, 1984.
7. Grzesik W., *Stan fizyczny warstwy wierzchniej przy toczeniu nożem jednokrawędziowym*, Mechanik 4/1983, 227-230.
8. Humienny Z.(red.), *Specyfikacje Geometrii Wyrobów (GPS) – wykład dla uczelni technicznych*. Oficyna Wydawnicza PW, 2001, – 540s.
9. Jańczuk B., Białopiotrowicz T., *Swobodna energia powierzchniowa niektórych polimerów*. Polimery. 32 (1987) 269-271.
10. Jemielniak K., *Obróbka skrawaniem*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2004.
11. Kłonica M., Kuczmaszewski J., *Badania właściwości energetycznych warstwy wierzchniej wybranych stopów al i mg po obróbce frezowaniem*. Obróbka skrawaniem współczesne problemy, Szkoła Obróbki Skrawaniem, pod redakcją Bogdana Kruszyńskiego, Łódź 2010, ISBN 83-920269-3-4, s. 341-348.
12. Kłonica M., Kuczmaszewski J., *Analiza energetyczna warstwy wierzchniej po ozonowaniu materiałów konstrukcyjnych stosowanych w przemyśle lotniczym*. Inżynieria powierzchni. Wybrane zagadnienia. Monografie, Studia, Rozprawy M17 pod redakcją Bogdana Antoszewskiego. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2011 PL ISSN 1897-2691, s. 171-180.
13. Kłonica M., Kuczmaszewski J., Ozonok J., *Ocena porównawcza właściwości energetycznych warstwy wierzchniej stopu tytanu*. Inżynieria materiałowa 5/2009.
14. Kuczmaszewski J., *Fundamentals of metal-metal adhesive joint design*. Politechnika Lubelska. Oddział PAN w Lublinie, 2006.
15. Mabrouki T., Girardin F., Asad M., Rigal J., *Numerical and experimental study of dry cutting for an aeronautic aluminium alloy (A2024-T351)*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 48 (2008) 1187- 1197.
16. Oczko K.E., *Doskonalenie procesów kształtowania ubytkowego stopów aluminium*. Mechanik nr 3,4/2009 Oczko K.E., *Efektywne skrawanie stopów magnezu*. Mechanik nr 7/2000.

17. Oczóś K. E., *Kierunki zwiększania produktywności procesów skrawania*, Mechanik 5–6/2007.
18. Roy P., Sarangi S.K., Ghosh A., Chattopadhyay A.K., *Machinability study of pure aluminium and Al-12% Si alloys against uncoated and coated carbide inserts*. Journal of Refractory Metals & Hard Materials 27 (2009) 535–544.
19. Sa´nchez J.M., Rubio E., A´lvarez M., Sebastia´n M.A., Marcos M., *Microstructural characterisation of material adhered over cutting tool in the dry machining of aerospace aluminium alloys*. Journal of Materials Processing Technology 164–165 (2005) 911–918.
20. Sieniawski J., *Stopy aluminium stosowane w technice lotniczej*, Mechanik 7/2009, 649–654.
21. Tönshoff H. K., Winkler J., *The influence of tool coatings in machining of magnesium*. Surface and Coatings Technology 94-95 (1997) 610-616.
22. Yousefi R., Ichida Y., *A study on ultra–high-speed cutting of aluminium alloy: Formation of welded metal on the secondary cutting edge of the tool and its effects on the quality of finished surface*. Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology 24 (2000) s. 371–376.
23. Zalewski A., *Efektywne wytwarzanie dzięki optymalnej strategii obróbki HSM*. Projektowanie i konstrukcje inżynierskie, grudzień 2007.

8. Zasady bezpiecznej obróbki stopów magnezu

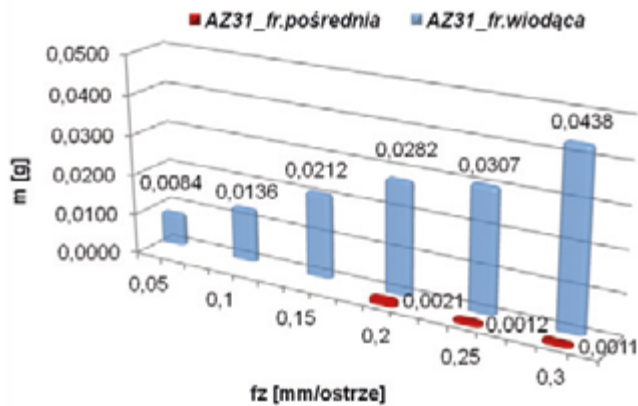
Zarówno ze względów technologicznych jak i bezpieczeństwa podczas obróbki stopów Mg celowym wydaje się podjęcie próby określenia zaleceń technologicznych, w celu określenia bezpiecznych a zarazem wydajnych parametrów obróbki frezowaniem.

8.1. Zagrożenia podczas obróbki stopów magnezu

Główne ograniczenia w obróbce stopów magnezu związane są ze sposobem prowadzenia danej obróbki skrawaniem. Skrawając stopy magnezu obróbkę możemy prowadzić w kilku wariantach: na sucho, z chłodzeniem cieczami mieszalnymi z wodą (emulsjami) oraz z chłodzeniem cieczami niemieszalnymi z wodą (olejami), z minimalnym smarowaniem. Największym ryzykiem podczas skrawania na sucho jest ryzyko zapłonu wiórów podczas obróbki. Dlatego też, zasady bezpiecznej obróbki, zostaną omówione głównie w oparciu o analizę obróbki na sucho stopów Mg.

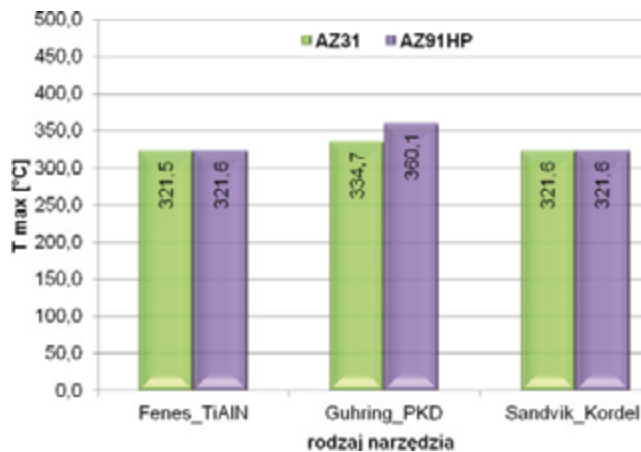
Podczas frezowania występuje przerywany kontakt ostrza narzędzia z przedmiotem obrabianym (efekt przerywanego skrawania kolejnych ostrzy frezu), co dodatkowo wpływa pozytywnie na wartość temperatury generowanej w strefie obróbki (dodatkowy efekt chłodzący). Równie istotny jest kształt i charakter wiórów, które podczas frezowania są krótkie. Mimo to, z przeprowadzonej dotąd analizy wynika, że należy unikać skrawania z parametrami powodującymi rozdrobnienie, fragmentowanie wiórów, które wpływają na występowanie frakcji pośrednich wiórów.

Dla przykładu podczas zmiany posuwu na ostrze, w zakresie $f_z=(0,2\div 0,3)$ mm/ostrze obserwowano niekorzystne zjawisko powstawania frakcji pośrednich wiórów. Zaobserwowane zjawisko przedstawiono w formie graficznej na rys. 8.1.



Rys. 8.1. Wpływ zmiany posuwu na ostrze f_z na występowanie różnych frakcji wiórów w przypadku stopu AZ31; $v_c=300\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$, $a_e=14\text{mm}$

Determinującym czynnikiem jest również temperatura generowana w strefie skrawania. Generowanie, narastanie temperatury w strefie skrawania związane jest bezpośrednio z procesem formowania się wióra. Dodatkowo w procesach szybkozmiennych, w celu pomiaru temperatury w strefie skrawania, celowe wydaje się stosowanie szybkich kamer, zarówno wizyjnych jak i termicznych. Przykładowe maksymalne wartości temperatury wiórów podczas frezowania przedstawiono na rys. 8.2.



Rys. 8.2. Wpływ rodzaju narzędzia na temperaturę wiórów podczas frezowania stopów Mg; $v_c=400\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostrze}$, $a_p=6\text{mm}$, $a_e=14\text{mm}$ [11]

Z generowaną temperaturą (w strefie obróbki) związane są również siły skrawania. Wyższe wartości sił mogą powodować większe odkształcenia, większą

deformację w strefie tworzenia wióra a przez to wyższe temperatury podczas skrawania. Może to wpływać (zwłaszcza dla wiórów o mniejszej masie tj. dla pośrednich frakcji wiórów), na niekontrolowany zapłon podczas obróbki, zwłaszcza podczas frezowania z małą głębokością skrawania.

Ogólnie podczas doboru parametrów technologicznych frezowania (na sucho), należy kierować się poniższymi wytycznymi:

- stosować maksymalne, możliwe do uzyskania prędkości skrawania,
- nie stosować obróbki z małymi głębokościami skrawania (większe ryzyko samozapłonu), stosować wydajną, efektywną obróbkę, poprzez stosowanie dużych głębokości skrawania,
- stosować średnie wartości posuwów (większe posuwy mogą wpływać na powstawanie frakcji pośrednich wiórów),
- stosować narzędzia o tzw. „ostrej geometrii”, dedykowane m.in. do obróbki stopów Al.

Ogólnie należy stwierdzić, że za wytyczne służące do doboru parametrów technologicznych, podczas skrawania stopów Mg, należy stosować te, podane jako zalecane do obróbki stopów Al., przeznaczonych do przeróbki plastycznej oraz stopów z zawartością krzemu do ok.10%. Stopy magnezu przeznaczone do przeróbki plastycznej, mogą wykazywać skłonność do tzw. „zalepiania” narzędzi skrawających, powstawania narostu oraz powlekania (najczęściej powierzchni natarcia) cienką warstewką Mg. Odlewnicze stopy magnezu, ze względu na sposób ich otrzymywania (poprzez odlewanie) mogą wykazywać większą kruchość i mniejszą ciągliwość. Zarówno stopy odlewnicze, jak i przeznaczone do przeróbki plastycznej, podczas frezowania wykazują skłonność do tworzenia krótkich segmentowych wiórów [10].

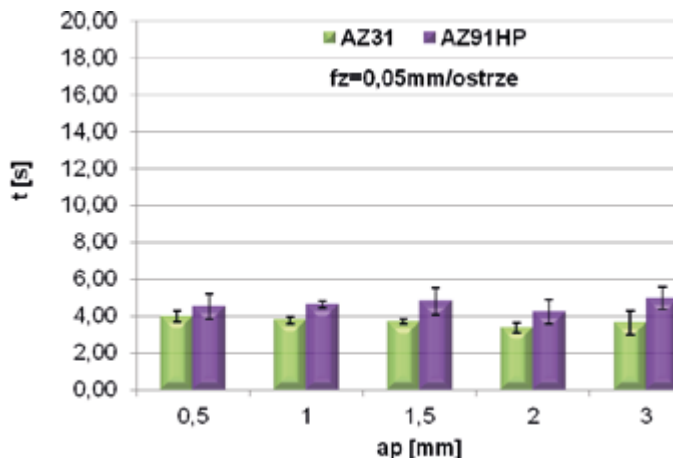
Ze względu na samozapłon, należy unikać skrawania z głębokościami mniejszymi od 1mm. Natomiast ze względu na występowanie frakcji pośrednich wiórów należy unikać skrawania z głębokościami mniejszymi niż 3mm. Należy również unikać, jeśli to tylko możliwe, „przejazdów” narzędzia po powierzchni obrobionej bez zadawania jakiegokolwiek głębokości skrawania. Głównie podczas takich zabiegów występuje największe prawdopodobieństwo zapłonu drobnych wiórów na skutek niepotrzebnego tarcia materiału narzędzia o materiał obrabiany. Podczas obróbki stopów Mg należy zwracać również szczególną uwagę na stan ostrza, tzn. nie należy obrabiać narzędziami stępienymi lub zużytymi [10].

Ponadto nie należy dopuszczać do sytuacji nadmiernego nagromadzenia wiórów w strefie obróbki. Należy pamiętać o okresowym czyszczeniu (najczęściej zamkniętej) przestrzeni roboczej obrabiarki.

Obrabiając stopy magnezu należy pamiętać, o powstawaniu pyłu magnezowego, który oprócz tego, że jest szkodliwy dla zdrowia człowieka, może wpływać na trwałość elementów obrabiarki (prowadnice i łożyska). Należy stosować obrabiarki z tzw. „zakrytymi” prowadnicami [10].

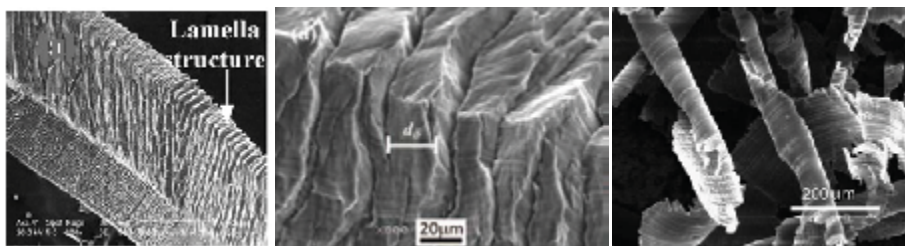
Dedykowaną metodą obróbki stopów lekkich jest metoda obróbki szybkościowej HSM. Metoda ta pozwala na otrzymanie wysokiej jakości powierzchni obrobionej (gdzie chropowatość powierzchni obrobionej $Ra \leq 1 \mu\text{m}$). Czas obróbki w przypadku tej metody jest znacznie krótszy niż przy obróbce konwencjonalnej. Dodatkowe korzyści, wynikające z obróbki szybkościowej to ograniczenie tworzenia się zadziorów, lepsze odprowadzanie wióra, zwiększona stabilność procesu, uproszczone oprzyrządowanie oraz niewielkie siły skrawania [5, 10]. Należy zauważyć, że nawet pomimo stwierdzenia, że nie wystąpiło niebezpieczeństwo zapłonu wiórów przy obróbce stopów magnezu, zawsze należy zachowywać odpowiednie procedury związane z ochroną przeciwpożarową [6].

W określaniu bezpiecznych zasad obróbki stopów magnezu, a więc i zakresu tzw. bezpiecznych parametrów technologicznych skrawania pomocny staje się tzw. czas do zapłonu wiórów analizowany na specjalnym stanowisku badawczym. Na rys. 8.3 przedstawiono wpływ zmiany głębokości skrawania a_p na średni czas do zapłonu wiórów, w przypadku skrawania narzędziem węglkowym z powłoką TiAlN.



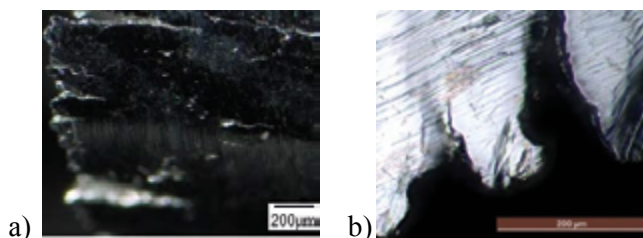
Rys. 8.3. Wpływ głębokości skrawania a_p na czas do zapłonu wióra przy $v_c=300\text{m/min}$, $f_z=0,05\text{mm/strze}$, $T_{\text{max}}=517,2^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=513,7^\circ\text{C}$

Kolejnym, szczególnie istotnym zagadnieniem, staje się analiza obszarów uplastycznionych na powierzchni wiórów. Ocena nadtopień bądź przypaleń na powierzchni wiórów dokonywana jest poprzez obserwację wiórów przy pomocy mikroskopii optycznej [6] lub SEM [1]. Charakter wiórów, brak nadtopień, ostra, poszarpana morfologia brzegów wiórów jest ważnym symptomem umożliwiającym wnioskowanie o wysokości temperatury w strefie skrawania. Również płytkowe struktury lamelarne [2, 12] obserwowano z użyciem skaningowej mikroskopii elektronowej. Na rys. 8.4 zaprezentowano przykłady struktur lamelarnych oraz przykład analizy nadtopień.



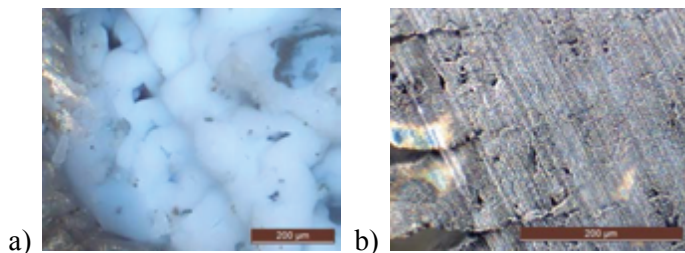
Rys. 8.4. Struktury lamelarne wiórów ze stopu Mg oraz poszukiwanie śladów nadtopień [1, 2]

Na rys. 8.5 podano obrazy metalograficzne wiórów ze stopów Mg. Nie zaobserwowano śladów nadtopień na krawędziach wiórów powstałych podczas frezowania, w zakresie zmiany prędkości skrawania v_c do 1200m/min oraz posuwu na ostrze f_z do 0,3mm/ostrze.



Rys. 8.5. Metalograficzna analiza obszarów uplastycznionych wiórów, fotografie wiórów ze stopów: a) AZ91HP $v_c=400\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostrze}$, $a_p=6\text{mm}$; b) AZ31 $v_c=800\text{m/min}$, $f_z=0,3\text{mm/ostrze}$, $a_p=6\text{mm}$ [6]

Jak wspomniano (rys. 8.5) nie zaobserwowano charakterystycznych śladów nadtopień, wskazujących na niebezpieczny, z punktu widzenia zapłonu, obszar obróbki. Wióry poddane zapłonowi oraz wióry poddane działaniu wysokiej temperatury przedstawiono na rys. 8.6.



Rys. 8.6. Wióry ze stopów magnezu: a) powierzchnia wióra poddanego zapłonowi (charakterystyczne białe ślady intensywnego utleniania); b) wiór poddany działaniu wysokiej temperatury (ok. 500°C), dla którego nie wystąpił zapłon

Ciekawym zagadnieniem jest również analizowanie form uplastycznienia się wióra poddanego działaniu wysokiej temperatury (powyżej 500°C). Analizy takie prowadzono z użyciem szybkiej kamery wizyjnej Phantom 9.1. Przy pomocy wspomianej kamery możliwe jest również określanie czasu do zapłonu wiórów. Na rys. 8.7 przedstawiono wybrane fazy uplastycznienia wióra, które występują przed zapłonem wióra.



Rys. 8.7. Wybrane etapy przed zapłonem wióra dla stopu AZ91HP; $v_c=400\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$

Dodatkowo nie należy dopuszczać do nagromadzenia wiórów w strefie skrawania. Należy okresowo czyścić strefę obróbki, aby nie stwarzać zagrożenia pożarowego. Ryzyko takie występuje podczas obróbki na sucho stopów Mg.

Podczas obróbki z dużymi prędkościami z zastosowaniem, jako cieczy smarująco-chłodzącej (CCS) oleju, może dochodzić do tzw. wyfuknięć lub wybuchów mieszaniny powietrza i mgły olejowej. Również pożary oleju, o ile nie zostaną szybko ugaszone mogą wywołać zapłon wiórów. W przypadku zastosowania, jako CCS emulsji, występuje ryzyko tworzenia się wodoru (zarówno na powierzchni elementów obrabianych jak i powierzchni wiórów), który jest niebezpieczny przy koncentracji większej niż 4% przestrzeni roboczej obrabiarki (ryzyko wybuchu) [7].

W celu utrzymania wiórów w stanie wilgotnym oraz zmniejszenia ryzyka zapłonu, wskazane jest transportowanie wiórów za pomocą rynien wypłukujących, aż do końca łoża obrabiarki i przyłączenie do układu rurociągu (rynny oraz rurociągi powinny być wypełnione olejem) [7].

Przy reakcji magnezu z wodą ważną rolę odgrywają skład i temperatura wody oraz wielkość cząstek magnezu. Przy dużej powierzchni właściwej (wióry, pyły) może zostać wyzwolona tak duża ilość wodoru, że utworzy on z tlenem mieszaninę wybuchową. Dysocjacja wody na jej składniki (wodór i tlen) powoduje zagrożenie eksplozją [8]. Z powodu możliwości samonagrzewania się i wydzielania wodoru w przypadku kontaktu z wodą lub innymi cieczami, zaleca się przechowywanie pojemników (z wiórami) w miejscu zadaszonym, lecz bardzo dobrze wentylowanym. Magazyny muszą być wykonane z materiałów niepalnych. Na opakowaniach (pojemnikach) należy umieścić napis: „Chronić przed wilgocią”. Pomieszczenia należy wyposażać w gaśnice do gaszenia sproszkowanych metali. Magnez i jego

stopy stwarzają specyficzne problemy w ochronie ppoż. Do gaszenia pożaru, pod żadnym warunkiem nie używać wody. Magnez reaguje z tlenem tak szybko, że przy pewnych warunkach woda podawana w celach gaśniczych może ulegać rozkładowi do jej podstawowych składników: tlenu i wodoru, powodując dalsze wzniecanie pożaru. Powinowactwo chemiczne magnezu i tlenu jest tak duże, że będzie on płonął nawet w atmosferze dwutlenku węgla. Magnez może także „spalać się” w atmosferze azotu tworząc azotek magnezowy (Mg_3N_2). W takich przypadkach stosowanie jakichkolwiek środków gaśniczych na bazie wody lub gazów obojętnych (oprócz gazów szlachetnych) będzie nieskuteczne. Do gaszenia pożarów stopów magnezu należy używać gaśnic typu D (z podstawowym środkiem gaśniczym – chlorkiem sodu), przeznaczonych m.in. do gaszenia pożarów metali palnych. Do gaszenia drobnych pożarów wiórów można doraźnie używać wiórów żeliwnych, odcinając w ten sposób dopływ tlenu. Wióry z magnezu oraz jego stopów należy przechowywać w szczelnych, dobrze wentylowanych niepalnych pojemnikach stalowych bądź aluminiowych. Magnez sproszkowany należy przechowywać w miejscu suchym i chłodnym, w temperaturze $(8 \div 15)^\circ C$ i wilgotności $(20 \div 60)\%$. Zasady magazynowania m.in. odpadów z magnezu i jego stopów określała wycofana bez zastąpienia norma PN-89/C-81400 [13, 14].

8.2. Zalecenia do obróbki stopów magnezu

Na podstawie przeprowadzonych analiz oraz wykonanych badań możliwe jest określenie zalecanych wartości parametrów technologicznych frezowania stopów magnezu na sucho (jako przypadku najbardziej niekorzystnego z punktu widzenia bezpieczeństwa obróbki). Wybrane zalecenia odnośnie zakresu analizowanych parametrów przedstawiono w tabeli nr 8.1.

Zalecane parametry zaznaczono „+”, parametry nie zalecane lub parametry o podwyższonym stopniu ryzyka zaznaczono, odpowiednio „-” lub „+/-”. Zalecane parametry technologiczne frezowania przedstawiono w zależności od analizowanych wskaźników skrawalności oraz innych analizowanych wskaźników [9].

Tabela 8.1. Zalecane parametry technologiczne frezowania stopów Mg [9]

- chropowatość powierzchni

Rodzaj narzędzia 9.	Gatunek stopu Mg 10.	v_c m/min ($f_z=0,15$ mm/ostrze, $a_p=6$ mm)		f_z mm/ostrze ($v_c=300$ m/min, $a_p=6$ mm) ($v_c=800$ m/min, $a_p=6$ mm)
		150÷400	500÷1200	0,05÷0,3
TiAlN 11.	AZ31	+	+	+
	AZ91HP	+	+	+

- siły skrawania

Rodzaj narzędzia 12.	Gatunek stopu Mg 13.	v_c m/min ($f_z=0,15$ mm/ostrze, $a_p=6$ mm)			f_z mm/ostrze ($v_c=800$ m/min, $a_p=6$ mm)		
		400	800	1200	0,05	0,15	0,3
TiAlN 14.	AZ31	+	+/-	+	+	+/-	-
	AZ91HP	+	+/-	+	+	+/-	-

- masa wiórów / fragmentowanie wiórów

a) obróbka konwencjonalna

Rodzaj narzędzia 15.	Gatunek stopu Mg 16.	v_c m/min ($f_z=0,15$ mm/ostrze, $a_p=6$ mm)					
		150	200	250	300	350	400
TiAlN 17.	AZ31	+	+	+	+	+	+
	AZ91HP	+	+	+	+	+	+

b) obróbka szybkościowa

Rodzaj narzędzia 18.	Gatunek stopu Mg 19.	f_z mm/ostrze ($v_c=800$ m/min, $a_p=6$ mm)		
		0,05	0,15	0,3
PKD 20.	AZ31	+	+	-
	AZ91HP	+	+	-

- temperatura w strefie skrawania

Rodzaj narzędzia 21.	Gatunek stopu Mg 22.	v_c m/min ($f_z=0,15$ mm/ostrze, $a_p=6$ mm)			f_z mm/ostrze ($v_c=800$ m/min, $a_p=6$ mm)		
		400	800	1200	0,05	0,15	0,3
PKD 23.	AZ31	+	+/-	-	+	+	-
	AZ91HP	+	+/-	-	+	+/-	-

Na podstawie prezentowanych zaleceń, odnośnie możliwości stosowania określonych zakresów parametrów technologicznych frezowania, możliwe jest

określenie oraz wytypowanie odpowiadających „czytelnikowi” wartości parametrów obróbki. Należy zwrócić uwagę na fakt, że o bezpieczeństwie obróbki w największym stopniu decyduje temperatura w strefie skrawania, stąd ten parametr powinien być kluczowy przy projektowaniu procesów obróbki [9].

W przypadku analizy wpływu zmiany geometrii ostrza (głównie kąta natarcia γ) oraz parametrów technologicznych frezowania stopu AZ91HP możliwym jest zaprezentowanie następujących zaleceń technologicznych [3, 4]:

- mniejsze wartości sił oraz amplitud występowały w przypadku narzędzia o kącie natarcia $\gamma=30^\circ$, więc korzystniej jest stosować narzędzia o tzw. „bardziej ostrej” geometrii ostrza (większy kąt natarcia γ), (podczas obróbki stopów magnezu jest to niezwykle ważne spostrzeżenie ze względu na bezpieczeństwo procesu, mniejsze siły generują mniejsze temperatury, a te minimalizują ryzyko samozapłonu małych wiórów w trakcie skrawania),
- przeprowadzone badania dotyczące jakości powierzchni po obróbce wskazują, że narzędzie o kącie natarcia $\gamma=5^\circ$ (w przeważającej większości przypadków) pozwalało na uzyskanie mniejszych parametrów chropowatości powierzchni, niż w przypadku zastosowania narzędzia o kącie $\gamma=30^\circ$ (większe różnice w jakości powierzchni po obróbce widoczne są na przykładzie powierzchni czołowej, gdzie wartości parametrów chropowatości powierzchni w przypadku zastosowania frezu o kącie $\gamma=5^\circ$, są dwu- , a nawet trzykrotnie większe, niż dla frezu o kącie $\gamma=30^\circ$),
- na podstawie uzyskanych wyników dotyczących stopnia fragmentacji wiórów można zauważyć, że mniej frakcji wiórów wydzielono dla narzędzia o kącie natarcia $\gamma=30^\circ$, parametrem, którego zmiana powodowała powstanie największej ilości wydzielonych frakcji była głębokość skrawania.

Ważniejsze uwagi oraz wnioski o charakterze ogólnym:

1. Z relacjonowanych badań wynika, że stopy magnezu są materiałami o bardzo dobrej obrabialności. Nie relacjonowane (w tej pracy) badania wskazują na relatywnie wyjątkowo długi okres trwałości narzędzi (w stosunku do skrawalności innych materiałów konstrukcyjnych).
2. Obróbka stopów magnezu może być prowadzona w sposób bezpieczny oraz efektywny w szerokim zakresie parametrów skrawania.
3. Temperatura w strefie skrawania, obserwowana dla technologicznych parametrów obróbki przewyższających aktualnie stosowane w przemyśle, nie stanowi zagrożenia dla zapłonu wiórów nawet w warunkach obróbki na sucho.
4. Potwierdzono wpływ rodzaju zastosowanego narzędzia na temperaturę w strefie skrawania.
5. Czas do zapłonu wiórów oraz analiza etapów zmian morfologicznych wióra, poprzedzających zapłon, mogą być stosowane w celu określania bezpiecznych zasad obróbki stopów magnezu.

6. Obraz morfologiczny wióra może być ważnym symptomem świadczącym o bezpieczeństwie podczas obróbki stopów Mg.
7. Przy obróbce stopów magnezu obserwuje się zjawisko fragmentowania wiórów, należy go unikać, drobne wióry wykazują większą skłonność do samozapłonu niż większe frakcje wiórów.

Literatura

1. Fang F.Z., Lee L.C., Liu X.D.: *Mean Flank Temperature Measurement in High Speed Dry Cutting*, Journal of Materials Processing Technology, 167 (2005), s.119–123.
2. Guo Y.B., Salahshoor M.: *Process mechanics and surface integrity by high-speed dry milling of biodegradable magnesium–calcium implant alloys*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 59 (2010), s.151-154.
3. Gziut O.: *Fragmentowanie wiórów w obróbce frezowaniem stopów magnezu*, Praca inżynierska, Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Lublin 2013.
4. Gziut O., Kuczmaszewski J., Zagórski I.: *The influence of technological parameters and geometric features of a cutting edge on cutting forces during AZ91HP alloy milling*, Advances in Manufacturing Science and Technology, Vol. 38, No. 2, 2014
5. Kuczmaszewski J.: *Efektywność wytwarzania elementów lotniczych ze stopów aluminium i magnezu*, Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie, Oficyna Wyd. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2011, s.7-18.
6. Kuczmaszewski J., Zagórski I.: *Badania masy, temperatury zapłonu oraz temperatury wiórów podczas skrawania wybranych stopów magnezu*, Mechanik 10/2012, str. 824-828.
7. Oczóś K.E.: *Efektywne skrawanie stopów magnezu*, Mechanik, 7/2000, s. 467-474.
8. Oczóś K.E.: *Rozszerzenie granic stosowalności stopów magnezu*, Mechanik, 5-6/2009, s. 386-400.
9. Zagórski I.: *Rozprawa doktorska.: Wpływ warunków technologicznych na efektywność i bezpieczeństwo frezowania stopów magnezu*, PL, 2015.
10. Zagórski I., Piesko P.: *Wpływ parametrów technologicznych na wartość wybranych wskaźników skrawalności lotniczych stopów Al oraz Mg*. X Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Technologiczne Systemy Informacyjne w Inżynierii Produkcji i Kształceniu Technicznym, Monografia „Innowacyjne Procesy Technologiczne” pod red. A. Świcia, Lublin 2011, s. 19-32.
11. Zgórnjak P., Grduńska A., Zagórski I.: *Sprawozdanie z badań procesu skrawania stopów magnezu*, badania w ramach projektu POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka.

12. Zhao N., Hou J., Zhu S.: *Chip ignition in research on high-speed face milling AM50A magnesium alloy*. Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, 15–17 July 2011, Inner Mongolia, China.
13. Bądkowski A.: *Karta charakterystyki niebezpiecznej substancji, Magnez – sproszkowany lub w kawałkach*, <http://www.am.wroc.pl/bhp.html>, z dnia 9.04.2010r.
14. Skorupa R., Mikołajek D.: *Gaszenie pożarów cieczy łatwopalnych i innych substancji*, Ogólnopolskie Seminarium Szkoleniowe „ADR w praktyce polskich przedsiębiorców”, <http://www.malopolskie.pl/Pliki/2006/8skorupa.pdf>, z dnia 29.01.2009r.

9. Chłodzenie i smarowanie w obróbce skrawaniem stopów aluminium i magnezu

Głównym zadaniem cieczy chłodząco-smarującej (CCS) w procesach obróbki skrawaniem jest zmniejszenie tarcia w strefie styku ostrza z przedmiotem obrabianym oraz przejmowanie części wydzielającego się ciepła. W konsekwencji obniża się temperatura w strefie skrawania, co wpływa na zwiększenie trwałości ostrza narzędzi oraz poprawę jakości obrabianych przedmiotów. Ze względu na znaczne koszty zakupu i utylizacji cieczy oraz konieczność ochrony środowiska, w końcu ubiegłego wieku rozpoczęto prace nad wyeliminowaniem CCS. Dzięki nowym materiałom narzędziowym, powłokom przeciwzużyciowym i rozwojowi maszyn technologicznych możliwa stała się obróbka na sucho. Jednakże, nie wszystkie zabiegi technologiczne są możliwe do wykonania bez całkowitego udziału cieczy. Alternatywą stała się obróbka z minimalną ilością środka smarnego. W ten sposób przez ostatnie dwadzieścia lat rozwinęły się nowe trendy w chłodzeniu i smarowaniu w obróbce skrawaniem. Obecnie dzieli się ją na obróbkę na mokro i na sucho, w tym obróbkę z minimalną ilością środka smarnego MQL (Minimal Quantity Lubrication), zwaną quasi-obróbką na sucho.

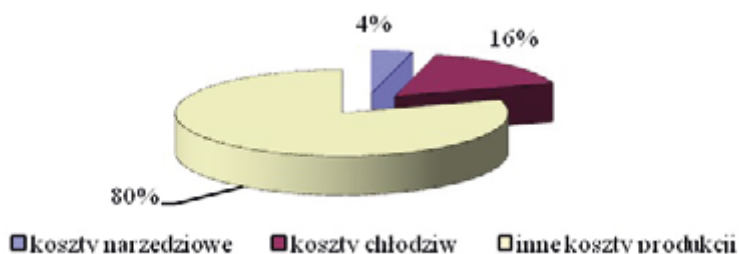
Obróbka stopów aluminium i magnezu, ze względu na ich zróżnicowane właściwości, wymaga doboru właściwej strategii chłodzenia i smarowania. Stopy aluminium, w zależności od skrawalności, dzieli się na trzy podstawowe grupy. Gorszą skrawalność mają stopy o małej zawartości krzemu, posiadające skłonności do powstawania narostu (skłonność do przywarć adhezyjnych i rozmazywania się), oraz stopy odlewnicze o dużej zawartości silnie oddziałującego ściernie krzemu. Najlepiej skrawalne są stopy obrabiane cieplnie, nazywane popularnie „duralami”.

Stopy magnezu, ze względu na niewielką gęstość, są materiałami chętnie stosowanymi w przemyśle lotniczym, jak i do wytwarzania przedmiotów codziennego użytku (obudowy laptopów czy telefonów komórkowych). Głównym ograniczeniem w obróbce stopów magnezu są kwestie bezpieczeństwa. Zagrożenie zapłonem i wybuchem może zostać wyeliminowane przez zastosowanie odpowiedniego środka smarnego. Również ze względu na zagrożenie wybuchem, nie stosuje się cieczy zawierających wodę w obróbce stopów magnezu.

9.1. Rola cieczy obróbkowych w procesie skrawania

Ciecze chłodząco-smarujące w procesie skrawania, szczególnie stopów aluminium, pozwalają na zmniejszenie efektu adhezyjnego przywierania materiału do powierzchni natarcia, zmniejszając w ten sposób skutki powstawania narostu. Skuteczne chłodzenie i smarowanie korzystnie wpływa na zużycie ostrza, wydłużając jego trwałość, stabilizuje proces termicznie, wpływając na dokładność wymiarowo-kształtową i jakość powierzchni.

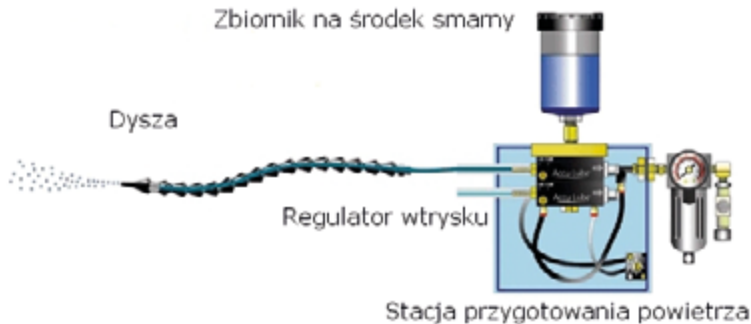
Ciecze chłodząco – smarujące w procesie skrawania, oprócz odbioru ciepła ze strefy skrawania i minimalizowania skutków oddziaływań tribologicznych na styku wiór ostrze, wpływają na łamanie i usuwanie wiórów ze strefy skrawania, zmniejszenie skutków oddziaływań adhezyjnych na powierzchni natarcia i przyłożenia, a także zabezpieczenie antykorozyjne powierzchni obrabianego materiału. Ciecze chłodząco-smarujące generują znaczne koszty, mogą stanowić one 16% kosztów produkcji całkowitej, co przedstawiono na rys. 9.1[1,14,16].



Rys. 9.1. Udział chłodziw w kosztach produkcji [2]

Stąd ciągłe dążenie do minimalizowania ich udziału lub lepsze i bardziej wydajne wykorzystanie. Próby całkowitego ich wyeliminowania, w przypadku obróbki stopów aluminium, nie powiodły się ze względu na duże problemy z narostem oraz właściwościami plastycznymi materiału. Obróbkę na sucho całkowicie należy wykluczyć w przypadku zabiegów gwintowania i głębokiego wiercenia. Również podawanie mgły olejowej, przy tradycyjnym dostarczaniu oleju przez dyszę (rys. 9.2), nie zapewniało stabilności procesu. Dopiero zastosowanie narzędzi z kanałami wewnętrznymi pozwoliło na wiercenie głębokich otworów i gwintowanie [2]. W krótkim czasie powstały również konstrukcje elektrowrzecion, które umożliwiały wykorzystanie tradycyjnej emulsji i dostarczanie jej pod zwiększonym ciśnieniem przez kanały umieszczone tak, aby medium dostawało się bezpośrednio do strefy skrawania. O ile zastosowanie tego sposobu dostarczania cieczy wydaje się być idealnym rozwiązaniem przy wierceniu głębokich otworów lub obróbce ciągłej, gdzie kontrola wióra jest utrudniona, o tyle przy tradycyjnym frezowaniu powierzchni wydaje się, że technologia ta nie musi być rozwiązaniem

konkurencyjnym w stosunku do mgły olejowej. Biorąc pod uwagę większy koszt elektrowniczona, droższe narzędzia, koszty zakupu i utylizacji chłodziwa, może się okazać, że aspekt ekonomiczno-ekologiczny przeważa. Niedogodnością stosowania aerozolu (mgły) jest konieczność szybkiego usunięcia z przestrzeni roboczej frezarki, co wymusza zastosowanie wyciągu.



Rys. 9.2. Podstawowy układ wytwarzania aerozolu (mgły) na przykładzie układu Accu Lube [21]

Do najczęściej stosowanych metod podawania płynów obróbkowych należy zaliczyć minimalne smarowanie, chłodzenie przez wrzeciono oraz tradycyjnym strumieniem cieczy chłodząco – smarującej.

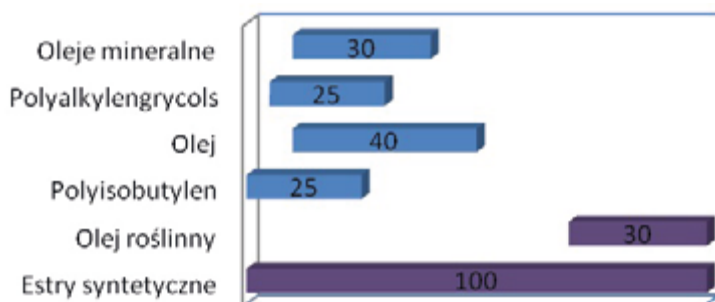
Minimalne smarowanie (MQL – Minimal Quantity Lubrication) zawdzięcza swoją nazwę małej ilości zużywanego podczas procesu obróbki oleju lub innego środka smarującego. Wydatek ten w najczęściej spotykanych rozwiązaniach oscyluje w granicach (30-50) ml/h i jest w głównej mierze uzależniony od sposobu generowania mgły olejowej. Dotyczy to podawania aerozolu do strefy skrawania za pomocą dyszy. W przypadku, gdy olej podawany jest kanałami przez narzędzie, wydatek ten może być mniejszy nawet o 50% [2]. Dodatkowy jednorazowy koszt stanowi instalacja MQL i wyciąg. Obecnie koszt profesjonalnej instalacji nie przekracza kwoty miesięcznego zużycia emulsji stosowanej do tradycyjnego chłodzenia.

Chłodzenie przez wrzeciono (CTS – Coolant Through of Spindle) wiąże się z droższym wrzecionem, wyciągiem do mgły, która powstaje w wyniku uderzenia wirujących strumieni cieczy o przedmiot obrabiany, oraz wyższymi kosztami narzędzi. Należy zauważyć, że przez rozpraszanie cieczy zwiększa się również jej straty, co przekłada się na zwiększenie kosztów zakupu emulsji i zużycie wody. Gdyby pokusić się o przeanalizowanie konkretnego przypadku mogłoby się okazać, że w ciągu jednej zmiany wyparuje więcej emulsji niż zużyje się oleju w instalacji MQL.

Tradycyjne chłodzenie (Cooling) polega na podawaniu emulsji do strefy obróbki, często – za pomocą kilku dysz, pod niewielkim ciśnieniem, około (6-7) bar. W przypadku chłodzenia konwencjonalnego, chłodziwo ma najmniejsze szanse na dotarcie bezpośrednio w strefę skrawania a ciepło odbierane jest od wiórów,

przedmiotu obrabianego i narzędzia. Wydajność procesu uzależniona jest od wydatku podawanego chłodziwa i może wynosić (20-50) l/min [7,14]. Generalnie, ten rodzaj chłodzenia ma mniejszy wpływ na możliwość zmniejszenia skutków tribologicznych, a głównie odbiera ciepło ze strefy skrawania.

W obróbce skrawaniem wartość płynów obróbkowych, jak już wspomniano powyżej, może sięgać nawet 16% kosztów produkcji. Jasnym jest w tej sytuacji, że zastąpienie klasycznych sposobów chłodzenia i smarowania obróbką na sucho i MQL stanowi znaczny potencjał oszczędności dla nowoczesnego przemysłu. Ponadto, dzięki zastosowaniu minimalnego smarowania, można ograniczyć zużycie emulsji, a tym samym bezpośrednio zmniejszyć ilość zanieczyszczonej wody, ograniczyć niekorzystny wpływ na środowisko i człowieka. Nowoczesne chłodziwa są na tyle dobrze stabilizowane chemicznie i biologicznie, że nie wymagają ciągłego obiegu i filtrowania. Wydłużony czas eksploatacji nowoczesnych kondensatów sprzyja stosowaniu równolegle innych technik chłodzenia, tym samym ograniczając wydatki na utylizację. Obecne kierunki rozwoju pozwalają sądzić, że w przyszłości będzie się skrawać na sucho i z niewielką ilością płynu, stosować uniwersalne płyny w pełni biodegradowalne (rys. 9.3), które będą używane zarówno do smarowania węzłów tarcia, jak i stabilizowania procesu skrawania [7, 15].



Rys. 9.3. Stopień biodegradacji mediów stosowanych w różnych systemach minimalnego smarowania [16]

Obecnie w obróbce z zastosowaniem MQL, najczęściej, jako medium smarującego, używa się alkoholi tłuszczowych i estrów syntetycznych (olejów estrowych, czyli zmodyfikowanych olejów roślinnych), gdyż, ze względu na wysoką temperaturę zapłonu (powyżej 150°C) i małą toksyczność, mogą być podawane w postaci aerozoli lub par. Alkohole tłuszczowe mają niższą temperaturę zapłonu, ale lepsze właściwości chłodzące [7, 14].

Stosuje się dwa sposoby doprowadzenia mediów do ostrza narzędzia: zewnętrzne, które polega na tym, że aerozol wytwarzany jest w specjalnej instalacji i doprowadzany z jednej lub kilku dysz w pobliże narzędzia, lub wewnętrzne, sto-

sowane najczęściej w operacjach wiercenia czy gwintowania, polegające na tym, że medium obróbkowe doprowadzane jest przez wrzeciono i kanałki smarne w narzędziu. W systemie jednokanałowym aerozol wytwarzany jest poza narzędziem i doprowadzany do strefy skrawania przez wrzeciono. W systemie dwukanałowym wykorzystuje się przestrzeń w oprawce narzędzia jako komorę i aerozol powstaje bezpośrednio przed narzędziem, co zapobiega efektowi „odmieszania” aerozolu w trakcie transportu i tworzenia na ściankach kanałku filmu olejowego, który niekorzystnie może wpływać na skład mieszaniny powietrze-olej [7].

9.2. Chłodzenie i smarowanie w obróbce stopów aluminium

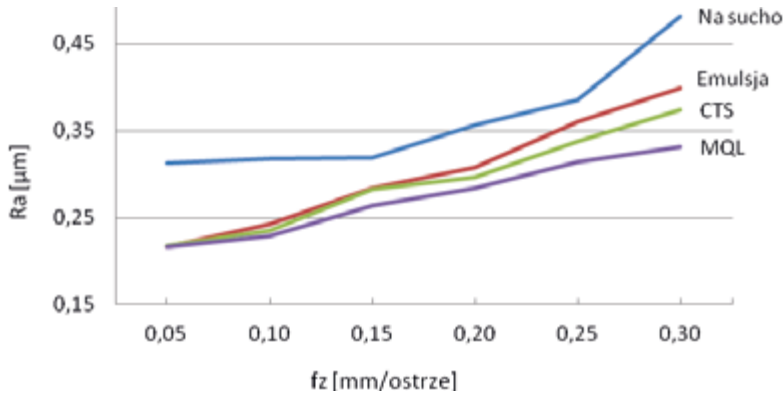
Rozwój sposobów smarowania i chłodzenia związany jest głównie z potrzebą zwiększania produktywności, zmniejszania kosztów produkcji oraz dbałością o środowisko naturalne. W procesie skrawania stopów aluminium stosowane jest zewnętrzne podawanie cieczy obróbkowej, doprowadzanie cieczy przez wrzeciono i kanałki w narzędziu oraz minimalne smarowanie.

Podczas frezowania i wiercenia stopów aluminium często występują problemy z odprowadzaniem wiórów ze strefy skrawania. Można je rozwiązać stosując sprężone powietrze, a wprowadzając niewielką ilość oleju (w postaci mgły lub kropeł) można zmniejszyć tarcie w obszarze skrawania. Wydaje się, że połączenie tych dwóch metod, wraz z możliwością zastosowania wysokiego ciśnienia (nawet 50 bar), stanowi kierunek rozwoju systemów chłodząco-smarujących [2].

Można zauważyć, analizując ilość narzędzi z kanałami doprowadzającymi ciecz obróbkową, które zostają wprowadzane na rynek, że są to narzędzia głównie do obróbki zgrubnej lub do operacji głębokiego wiercenia. Pojawiają się również rozwiązania z zastosowaniem urządzeń do podawania cieczy pod bardzo wysokim ciśnieniem.

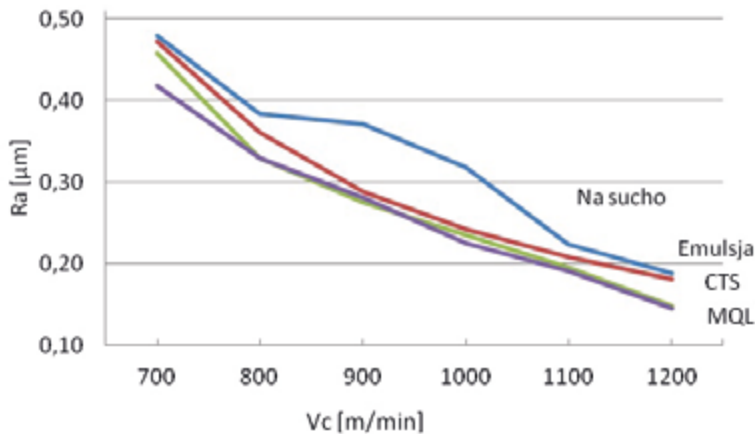
Stopy aluminium są źle obrabialne poprzez szlifowanie, dlatego dąży się do zapewnienia wymaganej chropowatości powierzchni i dokładności obrabianych przedmiotów w procesie obróbki wiórowej. W celu porównania chropowatości powierzchni stopów aluminium po obróbce frezowaniem czołowym z zastosowaniem różnych metod chłodzenia i smarowania przeprowadzono badania doświadczalne. Jako medium obróbkowe stosowano strumień emulsji, mgłę olejową (MQL) oraz podawanie cieczy obróbkowej przez wrzeciono (CTS). Przeprowadzono też obróbkę „na sucho”. Zmiennymi parametrami technologicznymi frezowania była prędkość skrawania i posuw.

Na rysunkach 9.4 i 9.5 przedstawiono wpływ sposobów chłodzenia i parametrów technologicznych frezowania stopu aluminium AW 7075 na chropowatość obrobionej powierzchni. Zarówno dla zmiennej prędkości skrawania v_c jak i posuwu na ostrze f_z obróbka bez użycia medium chłodząco-smarującego daje największe wartości badanych wskaźników chropowatości powierzchni.



Rys. 9.4. Porównanie wartości parametru chropowatości R_a po frezowaniu stopu aluminium 7075 z zastosowaniem różnych sposobów chłodzenia dla stałej prędkości skrawania $v_c = 900 \text{ m/min}$ [16]

W przypadku obróbki stopów aluminium na sucho, istnieje zagrożenie powstania bardzo intensywnego narostu, skutkującego niebezpieczeństwem przerwania procesu skrawania w wyniku trwałego uszkodzenia narzędzia. Zauważono, że w przypadku całkowitego zaklejenia powierzchni natarcia i następnie bardzo dokładnego jej oczyszczenia, nie posiada ona już pierwotnych właściwości i narost pojawia się coraz częściej, eliminując w ten sposób narzędzie. Wpływ posuwu f_z na parametr R_a chropowatości powierzchni pokazano na rysunku 9.4. Widoczny jest wzrost chropowatości powierzchni wraz ze zwiększaniem posuwu, przy czym wzrost ten jest najmniejszy w przypadku obróbki z minimalnym smarowaniem.



Rys. 9.5. Porównanie wartości parametru chropowatości R_a po frezowaniu stopu aluminium AW 7075 z zastosowaniem różnych sposobów chłodzenia dla stałej wartości posuwu na ostrze $f_z = 0,2 \text{ mm/ostre}$ [16]

Na rys 9.5. przedstawiono wpływ prędkości skrawania stopu aluminium AW 7075 na chropowatość powierzchni, z uwzględnieniem różnych sposobów chłodzenia. Można zauważyć, że w przedstawionym zakresie prędkości v_c największe wartości chropowatości uzyskano dla obróbki na sucho, a najmniejsze – po obróbce z zastosowaniem chłodzenia CTS oraz MQL. Zwiększenie prędkości skrawania w zakresie od 700 m/min do 1200 m/min powoduje znaczne zmniejszenie chropowatości powierzchni (dla każdego z zastosowanych sposobów chłodzenia).

9.3. Chłodzenie i smarowanie w obróbce stopów magnezu

Dzięki swoim właściwościom, głównie mniejszej gęstości, stopy magnezu stanowią alternatywę dla stopów aluminium. W przemyśle lotniczym i samochodowym, w wielu przypadkach, stopy aluminium są zastępowane przez kompozyty włókniste i stopy magnezu. Ze względu na ograniczenia w stosowaniu cieczy obróbkowych w procesie skrawania stopów magnezu (w kontakcie z wodą wydziela się wodór, co stwarza niebezpieczeństwo wybuchu), stopy te często obrabiane są na sucho. Jednak stosowanie obróbki na sucho może niekorzystnie wpłynąć na dokładność wymiarowo – kształtową i jakość powierzchni przedmiotów obrabianych oraz na zużycie narzędzi, a tym samym, na koszty wytwarzania. Podczas obróbki na sucho wyższa jest temperatura w strefie skrawania w porównaniu z obróbką „na mokro”. Jest to istotne ze względu na niską temperaturę zapłonu stopów magnezu i, związane z tym, zagrożenie pożarowe.

Biorąc pod uwagę przedstawione powyżej ograniczenia występujące podczas obróbki stopów magnezu, należy uznać, iż dobrym płynem obróbkowym dla tych stopów jest mieszanina oleju i powietrza (technologia MQL). Ryzyko zapłonu zmniejsza się ze wzrostem przekroju warstwy skrawanej, co uzasadnia łączenie technologii MQL ze stosowaniem dużych głębokości skrawania.

Ze stopów magnezu wykonuje się takie elementy jak korpusy, pokrywy, obudowy, kolektory, ramy. W procesie wykonania tych elementów szeroko stosowanym sposobem obróbki skrawaniem jest frezowanie. Układ do minimalnego smarowania, stosowany na frezarce pionowej przedstawiony został na rys. 9.6. Dzięki dobrej skrawalności stopy magnezu można frezować w zakresie wysokich parametrów skrawania. Nie mają one znaczącego wpływu na zużycie narzędzia a jedynym ograniczeniem może stać się zapotrzebowanie na moc [2].



Rys. 9.6. Układ MQL stosowany na frezarkach pionowych [17]

Bezpieczna strategia obróbki stopów magnezu związana jest, zatem, z zastosowaniem minimalnego smarowania i dużych głębokości skrawania, co sprzyja uzyskaniu maksymalnie dużej wydajności procesu. Interesujące, z punktu widzenia przebiegu obróbki, są siły skrawania i stabilność procesu przy dużych głębokościach skrawania [3]. W obróbce stopów magnezu unika się obróbki wykończeniowej. Tam gdzie jest to możliwe, strategia obróbki powinna być tak ustalana, aby eliminować skrawanie warstw o małym przekroju.

Podstawową trudnością w obróbce tego materiału na sucho jest intensywne tworzenie się narostu wskutek oddziaływania adhezyjnego poniżej krytycznej prędkości skrawania 900 m/min [5]. Przy wzroście temperatury skrawania dodatkowo istnieje ryzyko zapłonu małych wiórow. Zastosowanie minimalnego smarowania pozwala na przekroczenie prędkości krytycznych i zwiększenie wydajności obróbki, z jednoczesnym zachowaniem bezpieczeństwa. Zasadniczo skrawalność magnezu i jego stopów jest dobra. Przykładowo, siły skrawania są o 50% mniejsze, a okres trwałości 5-krotnie dłuższy niż przy obróbce aluminium [5]. Do obróbki stopów magnezu na sucho zasadniczo zaleca się stosowanie narzędzi z wkładkami PCD lub z węglików spiekanych pokrywanych warstwą PACVD-PCD. Podstawową zaletą tych materiałów jest uzyskanie bardzo dobrej jakości powierzchni oraz zmniejszenie ryzyka zapłonu wskutek obniżenia temperatury skrawania [6]. Wadą zasadniczą tego rozwiązania jest znacznie większy koszt w porównaniu do narzędzi dedykowanych do obróbki stopów aluminium. Zastosowanie minimalnego smarowania pozwala na użycie narzędzi przeznaczonych do obróbki stopów aluminium, z polerowaną powierzchnią natarcia i bez powłoki. Wskutek mniejszego oporu skrawania posuwy na ostrze mogą być zwiększone nawet do 0,6 mm/ostrze [5].

W obróbce stopów magnezu z zastosowaniem MQL najczęściej jako medium smarującego używa się alkoholi tłuszczowych i estrów syntetycznych [1,5]. W systemach zasilania MQL stosuje się dwa sposoby doprowadzenia medium smarującego do ostrza narzędzia – zewnętrzne i wewnętrzne [7]. W doprowadzeniu zewnętrznym aerozol wytwarzany jest w instalacji i doprowadzany dyszą do strefy obróbki. W przypadku wykonywania otworów oraz głębokich kieszeni lepszym rozwiązaniem jest doprowadzenie środka smarnego przez wrzeciono i kanałki w narzędziu. W celu wytworzenia aerozolu i doprowadzenia go przez kanałki w narzędziu, wykorzystuje się specjalne uchwyty wyposażone w komorę mieszania, dzięki czemu unika się odwirowania aerozolu we wrzecionie oraz strat medium, które powstają w wyniku osadzania się kropelek oleju na ściankach wrzeciona i uchwytu [8].

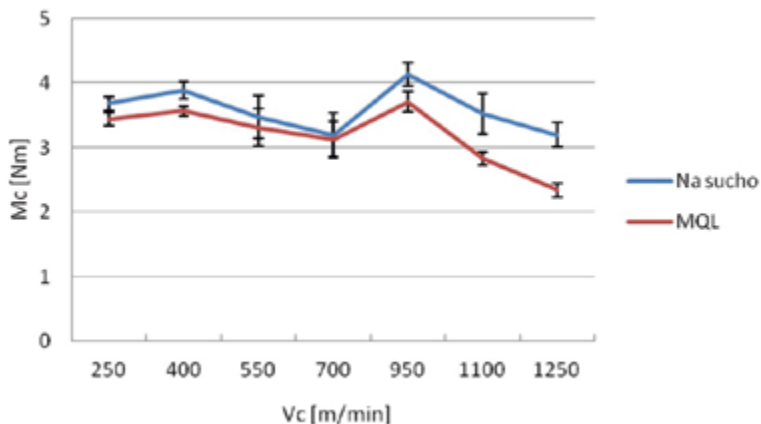
Korzystny wpływ na przebieg obróbki wywiera uniwersalny środek smarny – syntetyczny wielowodorotlenowy ester (poliol) o lepkości ok. 32 mm²/s w temperaturze 40°C i dużej skłonności do biodegradacji. Syntetyczny ester zawiera dodatki typu EP (ang. *Extreme pressure*), które tworzą na ostrzu mono- lub polimolekularne warstewki smarne, odporne na rozrywanie, lub mydła metaliczne, spełniające rolę smaru stałego. Dodatki typu EP – to związki siarki, chloru i fosforu, które pod wpływem wysokiej temperatury i dużego ciśnienia wchodzi w reakcje chemiczne z obrabianym materiałem i ostrzem, tworząc stały film smarny. Dla zastosowań w obróbce stopów magnezu, nowoczesne oleje zapewniają zmniejszenie tarcia, wpływającego na intensywność odkształceń plastycznych, zużycie ostrza i stan geometryczny powierzchni obrobionej. Pożądanym efektem jest tu z kolei wytwarzanie trwałego filmu smarnego redukującego oddziaływanie tribologiczne materiału obrabianego i ostrza [5]. Drugim pozytywnym aspektem jest kontrolowanie tworzenia narostu. Zmniejszenie temperatury w strefie skrawania, w przypadku podawania aerozolu dyszą, powoduje strumień powietrza. Również wskutek oddziaływania strumienia powietrza następuje usuwanie wiórów, co jest istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa.

Gromadzenie wiórów w strefie skrawania, w przypadku obróbki stopów magnezu, jest niedopuszczalne, gdyż w przypadku zapłonu grozi uszkodzeniem maszyny technologicznej. Należy pamiętać również, że w kontakcie z wodą wydziela się wodór.

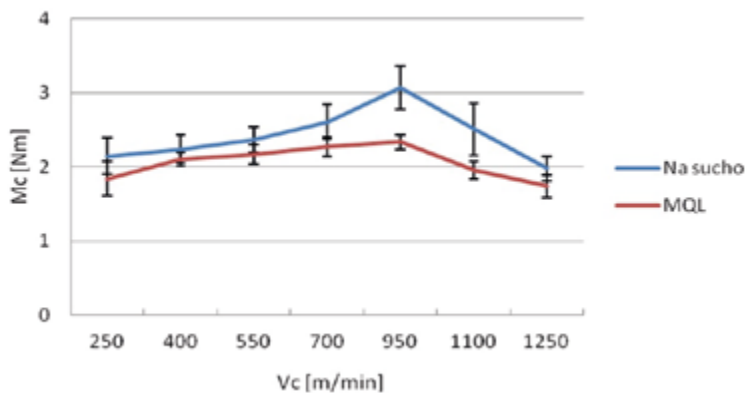
Wprowadzenie do strefy obróbki mgły olejowej wpływa na zmniejszenie momentu skrawania w procesie frezowania stopów magnezu AZ91HP oraz AZ31, co przedstawione zostało na rys. 9.7 – 9.10.

Porównanie momentu skrawania podczas frezowania na sucho i z minimalnym smarowaniem uwidacznia korzystny wpływ minimalnego smarowania na moment skrawania zarówno dla stopu AZ91 HP (rys. 9.7) jak i dla stopu AZ31 (rys. 9.8). Wahania wartości momentu skrawania podczas obróbki z mniejszymi prędkościami mogą być związane z występowaniem narostu. Po przekroczeniu

prędkości skrawania $v_c = 900$ m/min następuje wyraźny spadek momentu skrawania dla obydwu analizowanych stopów. W przypadku frezowania stopu magnezu AZ91HP, dodatki w postaci twardych cząstek składników stopowych pogarszają skrawalność tego stopu. Widać to wyraźnie w porównaniu do stopu AZ31, gdzie wartość momentu skrawania była znacznie mniejsza (o 30 – 40%).



Rys. 9.7. Porównanie wartości momentu skrawania M_C podczas frezowania stopu magnezu AZ91HP na sucho i z minimalnym smarowaniem ze zmienną prędkością skrawania ($f_z=0,3$ mm/ostrze, $a_p=6$ mm, $a_e=16$ mm) [17]

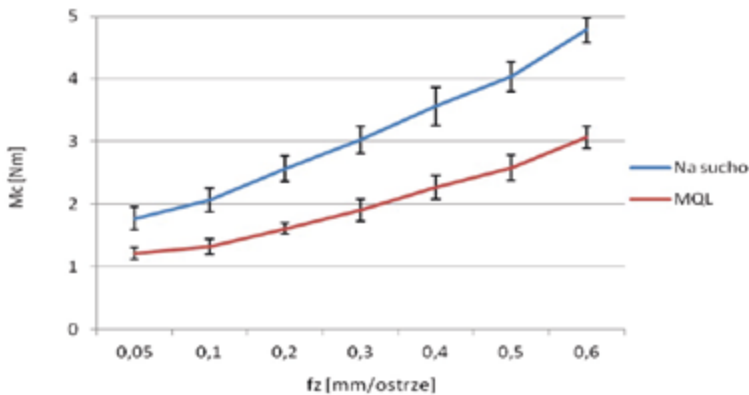


Rys. 9.8. Porównanie wartości momentu skrawania M_C podczas frezowania stopu magnezu AZ31 na sucho i z minimalnym smarowaniem ze zmienną prędkością skrawania ($f_z=0,3$ mm/ostrze, $a_p=6$ mm, $a_e=16$ mm), [17]

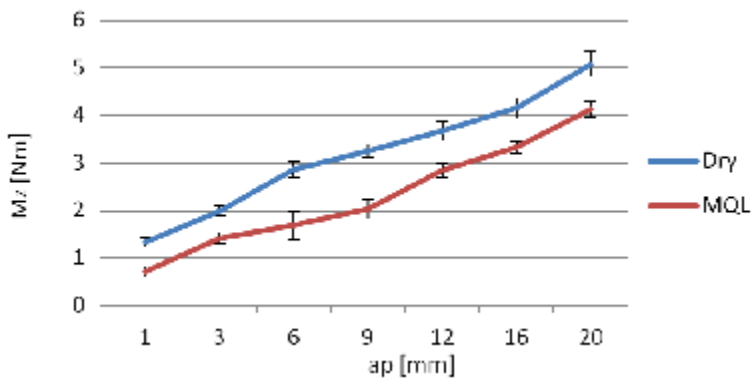
W wyniku zastosowania środowiska MQL w procesie frezowania stopów magnezu nastąpiło zmniejszenie momentu skrawania w granicach od kilku do ponad dwudziestu procent w porównaniu ze skrawaniem na sucho. To zmniejszenie

momentu skrawania bardziej widoczne jest w zakresie dużych prędkości skrawania, co świadczy o skutecznym przenikaniu mgły olejowej do strefy skrawania i dobrym oddziaływaniu smarującym w warunkach szybkiego przemieszczania się ostrza narzędzia względem materiału obrabianego. Zatem stosowanie środowiska MQL może być zalecane w warunkach frezowania z dużymi prędkościami (HSC) stopów magnezu.

Również porównanie momentu skrawania dla różnych posuwów frezowania uwidacznia korzystny wpływ mgły olejowej na wartość momentu (rys. 9.9).



Rys. 9.9. Porównanie wartości momentu skrawania M_C podczas frezowania na sucho i z minimalnym smarowaniem stopu AZ31 ze zmiennym posuwem ($v_c=900\text{m/min}$, $a_p=6\text{ mm}$, $a_e=16\text{ mm}$) [17]

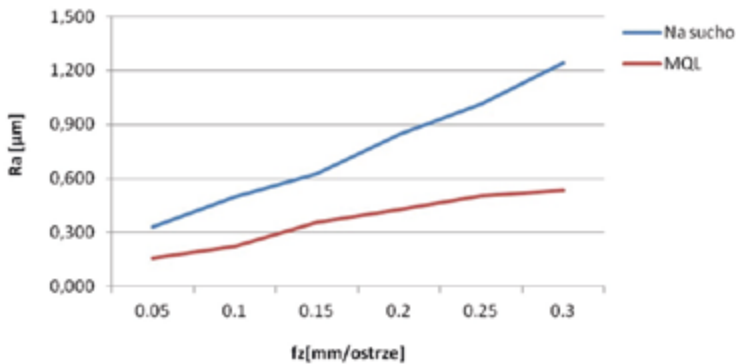


Rys. 9.10. Porównanie wartości momentu skrawania M_C podczas frezowania stopu AZ31 na sucho i z minimalnym smarowaniem ze zmienną głębokością skrawania ($v_c=900\text{ m/min}$, $f_z=0,3\text{ mm/ostre}$, $a_e=16\text{ mm}$) [17]

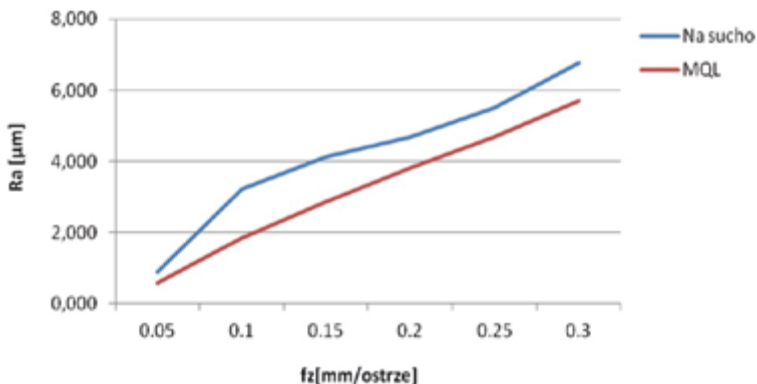
Zwraca uwagę znaczne zmniejszenie momentu skrawania w zakresie dużych posuwów, co może świadczyć o dobrym przenikaniu mgły olejowej.

Również badania skuteczności oddziaływania środowiska MQL na proces frezowania stopów magnezu z różnymi głębokościami skrawania wykazały, że zastosowanie MQL powoduje zmniejszenie momentu skrawania, przy czym zmniejszenie to jest w przybliżeniu jednakowe w całym zakresie uwzględnianych w badaniach głębokości skrawania.

Zastosowanie smarowania metodą MQL w procesie frezowania stopów magnezu korzystnie wpływa na chropowatość obrabianej powierzchni. Badano chropowatość powierzchni po frezowaniu kanałków frezem trzpieniowym, przy czym chropowatość mierzono zarówno na dnie jak i na powierzchni bocznej wyfrezowanego kanałku [16].



Rys. 9.11. Porównanie wartości parametru Ra chropowatości powierzchni po frezowaniu stopu magnezu AZ31 na sucho i z zastosowaniem MQL (pomiar na ścianie bocznej przedmiotu obrabianego) [16]



Rys. 9.12. Porównanie wartości parametru Ra chropowatości powierzchni po frezowaniu stopu magnezu AZ31 na sucho i z zastosowaniem MQL (pomiar na dnie przedmiotu obrabianego) [16]

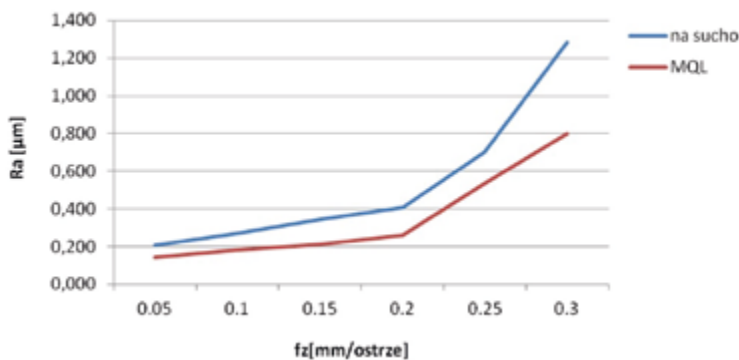
Wykazano, że w przypadku frezowania stopu AZ31, na ścianie bocznej uzyskano w wyniku zastosowania minimalnego smarowania (w całym zakresie badanych posuwów) zmniejszenie wartości parametru Ra o około pięćdziesiąt procent w stosunku do obróbki na sucho (rys. 9.11).

Również wartości parametrów chropowatości powierzchni mierzonych na dnie kanałku (od czoła frezu) są mniejsze w przypadku frezowania z udziałem MQL niż na sucho, chociaż różnice są znacznie mniejsze niż na ściankach bocznych (rys. 9.12). Można to wyjaśnić trudniejszym dostępem strumienia mgły olejowej do obszaru dna kanałku niż do ścianek bocznych.

Porównując rysunki 9.11 i 9.12 łatwo zauważyć, że chropowatość powierzchni na dnie kanałku jest znacznie większa niż na ściankach bocznych.

W oparciu o wyniki przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zastosowanie MQL umożliwia zwiększenie wydajności obróbki przy zachowaniu takiej samej wartości parametrów chropowatości powierzchni. Przykładowo, wartość parametru Ra = 0,3 μm uzyskuje się po frezowaniu na sucho dla posuwu $f_z=0,05$ mm/ostrze. Tę samą wartość Ra, przy zastosowaniu MQL, uzyskuje się dla posuwu $f_z=0,15$ mm/ostrze (rys. 9.11). Trzykrotny wzrost posuwu oznacza również trzykrotne zwiększenie wydajności objętościowej skrawania.

W przypadku stopu AZ91HP różnica między chropowatością powierzchni po obróbce na sucho i obróbce z MQL nie jest tak duża jak w przypadku stopu AZ31, ale jest widoczna (rys. 9.13).



Rys. 9.13. Porównanie wartości parametru Ra chropowatości powierzchni po frezowaniu stopu magnezu AZ91HP na sucho i z zastosowaniem MQL (pomiar na ścianie bocznej przedmiotu obrabianego) [16]

Porównując rysunki 9.11 i 9.13 można zauważyć, że dla stopu odlewniczego AZ91HP uzyskano niższe wartości parametrów chropowatości po frezowaniu z takimi samymi parametrami technologicznymi niż dla stopu AZ31, co można tłumaczyć mniejszą ciągliwością a większą twardością stopu AZ91HP.

Zwiększenie wydajności procesu frezowania stopów magnezu związane jest z możliwością frezowania tych materiałów z prędkościami zbliżonymi do prędkości stosowanych w obróbce stopów aluminium. Relatywnie mniejszy opór skrawania tych materiałów daje takie możliwości. Ograniczeniem w tym przypadku są względy bezpieczeństwa oraz stabilizacja procesu dla większych prędkości skrawania. Główną przyczyną ograniczania prędkości skrawania są względy bezpieczeństwa, wynikające z możliwości samozapłonu. Ograniczenie wynikające z braku możliwości stosowania emulsji wodorozcieńczalnych determinuje zastosowanie minimalnego smarowania (MQL) jako środka chłodząco-smarującego w obróbce stopów magnezu.

Literatura

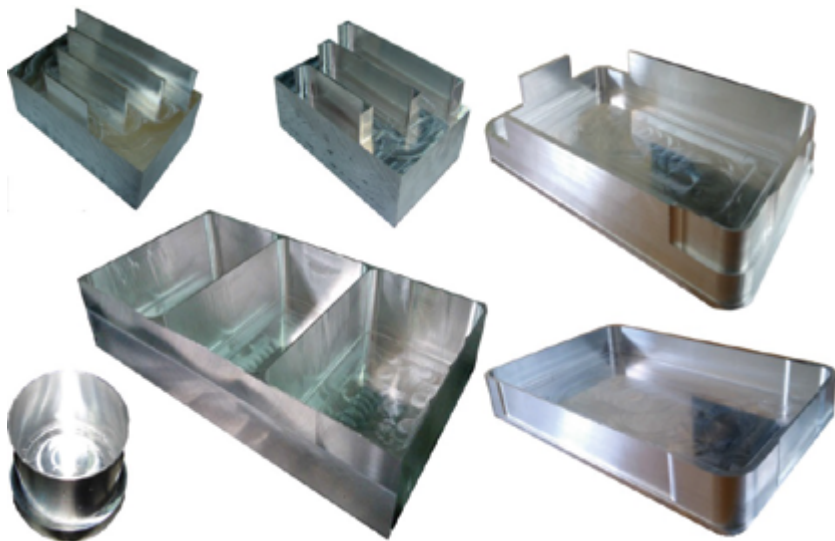
1. Diniz A.E., Ferreira J.R., Gilho F.T., (2003), „Influence of refrigeration/lubrication condition on SAE 52100 hardened steel turning at several cutting speeds”; *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43/317-326.
2. Dobrzański L. A., „Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo”, WNT 2007;
3. Grzesik W.: „Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych”, WNT 2010;
4. Kelly J.F., Cotterell M.G., (2002), „Minimal lubrication machining of aluminium alloys”; *Journal of Materials Processing Technology*, 120/327-334
5. Leppert T., Badania wpływu sposobu chłodzenia i smarowania na siły skrawania podczas toczenia, W: *Obróbka skrawaniem, Innowacje (Monografia)*, Kraków 2008, s.368-376.
6. Feld M.: „Obróbka skrawaniem stopów aluminium” WNT 1984;
7. Feldshtein E., Maruda R., Höhere Oberflächengüte beim Drehen durch Emulsion mit Additiv. *Maschinenmarkt*, 2008, nr 19, s. 38-41.
8. Kruszyński B., Wpływ kierunku podawania cieczy obróbkowej z minimalnym wydatkiem na siły przy szlifowaniu, W: *Materiały XXVIII Szkoły Obróbki Ściernej*, Warszawa – Mszczonów 2005, s.152-155.
9. Kuczmaszewski J., Efektywność wytwarzania elementów lotniczych ze stopów aluminium i magnezu, *Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją*, Opole 2011, s.7-18.
10. Oczóś K., Doskonalenie strategii chłodzenia i smarowania w procesach obróbkowych, *Mechanik* nr10, 2004, s. 597-606.
11. Oczóś K., Kawalec A., *Kształtowanie metali lekkich*, Wydawnictwo Naukowe PWN 2012.
12. Pałka T., Zaleski K.: „Chropowatość powierzchni stopu aluminium po frezowaniu z minimalnym smarowaniem.”, W: *Innowacyjne procesy wytwórcze*, Red.: Świć A., Taranenko V. *Politechnika Lubelska, Lublin* 2013, s. 87-96

13. SU Y. i in., Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials, *Sk Int.J.of Mach.Tools a.Manuf.*, 2007, t. 47, nr 6, s. 927-933.
14. Suda S., Yokota H., Inasaki I., Wakabaiashi T., (2002); „A Synthetic Ester as an Optimal Cutting Fluid for Minimal Quantity Lubrication Machining”; *Annals of the CIRP*, 51/1:1995-8.
15. Weiner K., Inasaki I., Sutherland W., Wakabajashi T., (2004); „Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication”; *Annals of the CIRP*, 53/2:511-37.
16. Zaleski.K., Pałka T., „Wpływ minimalnego smarowania na chropowatość powierzchni stopów magnezu po frezowaniu”, *Mechanik* 8-9/2012, 439-446,
17. Zaleski.K., Pałka T., „Wpływ minimalnego smarowania na moment skrawania podczas frezowania stopów magnezu”., *Mechanik* 8-9/2013, 581-588,
18. PN-EN 573-3 Aluminium i stopy aluminium
19. www.guhring.com, producent narzędzi skrawających, z dnia 21.05.2013
20. Poradnik narzędzi skrawających www.kendu.es, z dnia 02.04.2012
21. www.accu-lube.com, z dnia 12.04.2014

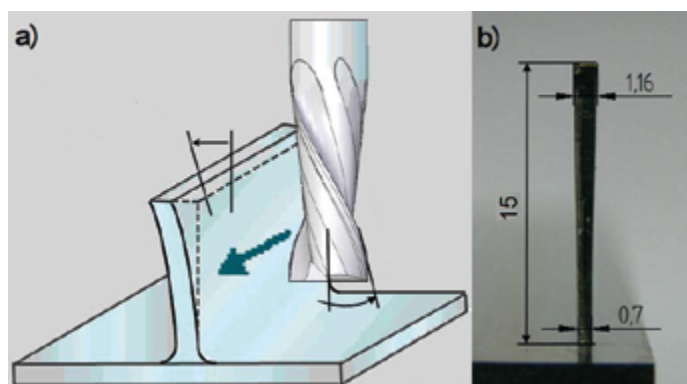
10. Obróbka elementów cienkościennych wykonywanych ze stopów aluminium i magnezu

Cienkościennie konstrukcje kieszeniowe, ze względu na małą masę oraz wysoką sztywność, stosowane są głównie w przemyśle lotniczym. Inne zastosowania to przemysł motoryzacyjny i budowlany. Konstrukcje tego typu wykorzystuje się m.in. do wykonania elementów kadłubów, podwozi, korpusów przekładni i elementów nośnych statków powietrznych. We współczesnych konstrukcjach lotniczych, pomimo coraz szerszego stosowania nowoczesnych materiałów takich jak np. kompozyty, głównym materiałem konstrukcyjnym są nadal stopy metali lekkich takich jak aluminium, magnez czy tytan. Stopy aluminium w niektórych konstrukcjach lotniczych stanowią nawet 80% całkowitej ich masy. Najczęściej, jako półfabrykaty do wykonywania konstrukcji cienkościennych stosowane są przerobione plastycznie durale, w postaci płyt o różnej grubości. Ze względu na gabaryty, złożoność oraz wielkość produkcji wykonywanie tych konstrukcji metodami obróbki plastycznej, w postaci odkuwek czy wyprasek, jest często technologicznie niemożliwe oraz ekonomicznie nieopłacalne. Wykonując elementy cienkościennie stosuje się więc, ze względu na znaczny ubytek masy sięgający nawet 97%, nowoczesne, wysokowydajne metody obróbki ubytkowej takie jak frezowanie: HPC – obróbka zgrubna i HSC – obróbka wykończeniowa. Metody te są obecnie standardem w obróbce stopów aluminium [5, 6].

Głównym problemem w trakcie obróbki skrawaniem konstrukcji cienkościennych (przykłady wykonanych elementów cienkościennych przedstawiono na rys.10.1) 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.10.2a). Po zdjęciu obciążenia ścianka sprężystość powraca do pierwotnego położenia i przyjmuje w przekroju poprzecznym charakterystyczny trapezowy zarys (rys.10.2b). Jej grubość jest mniejsza u podstawy i rośnie w kierunku górnej krawędzi ścianki [1, 3, 7-10].



Rys. 10.1. Przykłady konstrukcji cienkościennych



Rys. 10.2. Odształcenia towarzyszące obróbce elementów cienkościennych a) odkształcenie ścianki i narzędzi [1], b) zarys ścianki po obróbce

Odształceniom sprężystym ulega również układ narzędzie-oprawka-wrzeciono (rys.10.2a). Wysokowydajna obróbka głębokich, cienkościennych konstrukcji kieszeniowych wymaga stosowania narzędzi o dużych wyśięgach, co wpływa na zwiększenie odkształceń tego układu. Odształcenia te przekładają się na dokładność obróbki przedmiotu w odmienny sposób niż odkształcenia samej ścianki. Ugięcie narzędzia powoduje zwiększenie grubości ścianki u jej podstawy (wpływ wyśięgu narzędzia na dokładność obróbki cienkościennych konstrukcji kieszeniowych szczegółowo omówiono w rozdziale 11). Na dokładność obróbki przedmiotu wpływ mają więc ugięcie ścianki oraz narzędzia (rys.10.2a). W praktyce odkształcenia te

„nakładają” się i w zależności od grubości i wysokości 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. Odształcenia sprężyste narzędzia i obrabianej ścianki, oprócz błędów kształtu, mogą wywoływać niestabilność procesu, co wpływa na pogorszenie jakości obrabianych powierzchni. Brak stabilności jest przyczyną powstawania drgań i może objawiać się w postaci karbowania (*ang.* „*chatter*”) obrabianej ścianki (rys.10.3).



Rys. 10.3. *Efekt braku stabilności w postaci karbowania (chatter)*

Stabilną pracę można uzyskać m.in. przez właściwy dobór parametrów skrawania lub stosowanie narzędzi o geometrii zmniejszającej skłonności do powstawania drgań. Zapewnia to oprócz zmniejszenia odształceń oraz polepszenia jakości powierzchni przedmiotu obrabianego, zwiększenie trwałości narzędzia.

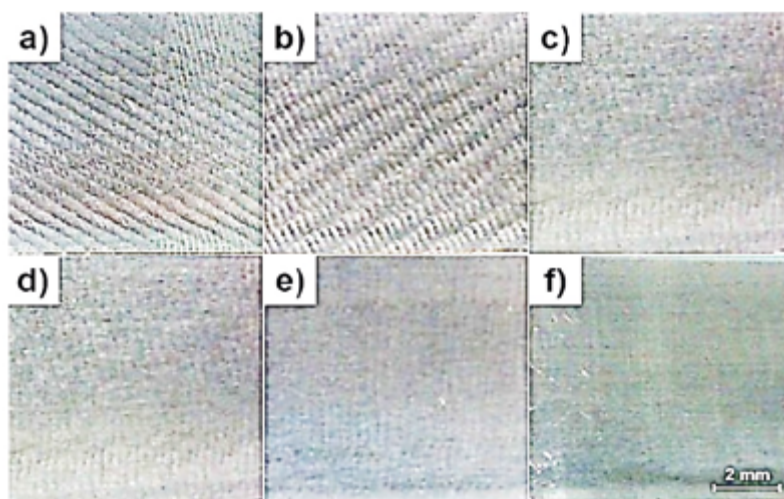
W celu minimalizacji drgań stosuje się narzędzia z różną podziałką ostrzy oraz zmiennym lub różnym kątem pochylenia linii śrubowej. Przykład frezów ze zróżnicowanym kątem pochylenia linii śrubowej (DHC – *Different Helix Cutter*) przedstawiono na rys.10.4. Dzięki różnym kątom wzniosu linii śrubowej następujących 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 [4].



Rys. 10.4. *Frezy DHC o zróżnicowanym kącie pochylenia linii śrubowej [4]*

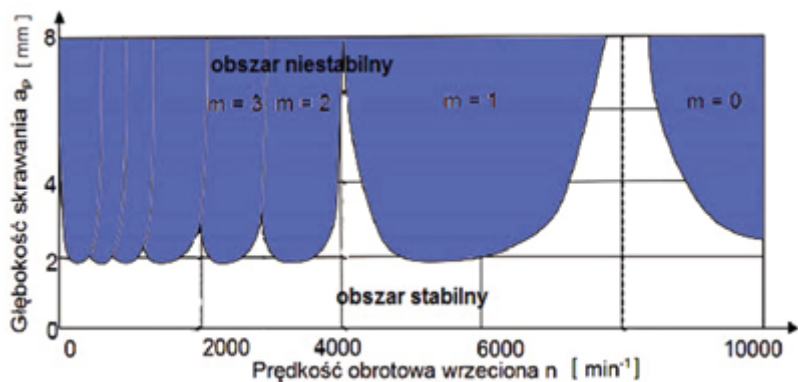
Podwyższenie prędkości skrawania do zakresu odpowiadającego obróbce HSC powoduje obniżenie sił skrawania (rys. 3.7), co wpływa na zmniejszenie odkształceń zarówno obrabianych elementów cienkościennych jak i narzędzia. Obniżenie sił skrawania, a szczególnie składowej prostopadłej do powierzchni obrabianej, która w największym stopniu wpływa na odkształcenia ścianki, można uzyskać również dzięki optymalizacji parametrów wpływających na przekrój warstwy skrawanej, tj. posuwu f_z , głębokości a_p i szerokości a_e skrawania. Niższe opory skrawania generują mniejsze naprężenia obróbkowe, co minimalizuje odkształcenia obrabianego elementu oraz zapewnia wyższą jakość i dokładność wykonania [14].

Ponadto wzrost prędkości skrawania w szerokim zakresie korzystnie wpływa na poprawę jakości powierzchni (rys. 3.3), które charakteryzują się większą regularnością śladów obróbkowych oraz niższą chropowatością i falistością w stosunku do powierzchni obrabianych z klasycznymi parametrami skrawania. Na rys. 10.5. widoczne jest zmniejszenie chropowatości powierzchni elementów cienkościennych wraz ze wzrostem prędkości skrawania.



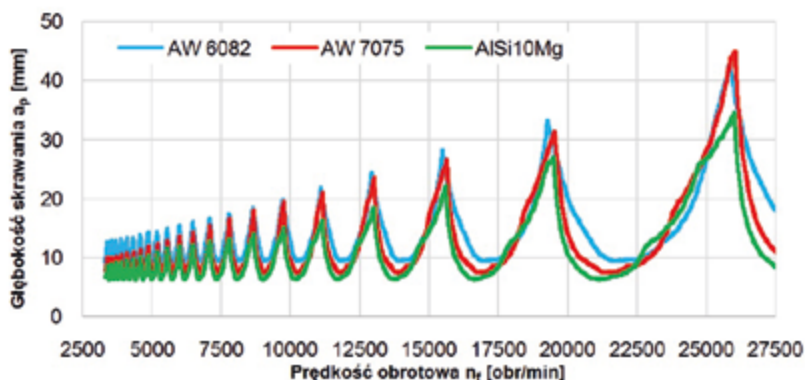
Rys. 10.5. Widok powierzchni elementów cienkościennych wykonanych ze stopu EN AW-7075 obrabianych z różnymi prędkościami skrawania v_c : a) 150 m/min; b) 300 m/min; c) 450 m/min; d) 600 m/min; e) 750 m/min; f) 900 m/min

Świadczy to o korzystnym wpływie zwiększenia prędkości skrawania na poprawę chropowatości powierzchni. Wyższe prędkości skrawania zapewniają łatwiejsze uzyskanie stabilnej pracy narzędzia, co można zaobserwować na wykresach stabilności (rys. 10.6).



Rys. 10.6. Przykładowy wykres stabilności – krzywa workowa [2, 11]

Wynika to z tego, że powierzchnie obszarów stabilnych, znajdujące się poniżej krzywych workowych, zwiększają się wraz ze wzrostem prędkości skrawania (rys. 10.6 i 10.7). Powiększa to zakres parametrów technologicznych, dla których praca narzędzia może być stabilna.



Rys. 10.7. Przykładowe wykresy stabilności dla trzech różnych stopów Al

Na rys. 10.7 przedstawiono przykładowe krzywe stabilności (tzw. krzywe workowe), uzyskane dla trzech różnych stopów. Widoczne są pewne różnice w przebiegach tych krzywych w zależności od gatunku stopu Al. Wynika z tego, że na przebieg obróbki oraz jej stabilność mają również wpływ właściwości obrabianego materiału.

Problemy w trakcie obróbki elementów cienkościennych wymusiły konieczność stosowania specjalnych strategii obróbki oraz narzędzi skrawających.

Według danych literaturowych [12, 14] wybór właściwej strategii obróbki, uzależniony jest od stosunku wysokości ścianki do jej grubości. W zależności

od wartości tego stosunku, zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 10.8, można zastosować jedną z czterech strategii obróbki cienkich ścianek [12, 14]:

- 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. 10.8. Strategie obróbki cienkich ścianek [12, 14]

Strategia I polegająca na obróbce do pełnej wymaganej głębokości jednej strony ścianki, a następnie powtórzeniu tej obróbki po przeciwnej stronie, zalecana jest dla stosunku wysokości do grubości ścianki nieprzekraczającego wartości $15:1$. Strategie II i III stosowane są dla stosunku wysokości do grubości ścianki poniżej $30:1$. Lepsze efekty zapewnia strategia III, w której oprócz naprzemiennej obróbki stron ścianki stosuje się różnicę poziomów obróbki, co gwarantuje pewniejsze podparcie ścianki w obrabianym punkcie. Pierwsze przejście wykonuje się z głębokością skrawania równą $a_p/2$. Dla ścianek o najwyższych wartościach stosunku wysokości do grubości, przekraczających $30:1$ zalecane jest stosowanie strategii IV tzw. „choinki”, w której oprócz zmian stron ścianki podczas obróbki, żądaną jej grubość uzyskuje się etapowo. W trakcie obróbki część ścianki o mniejszej grubości podpierana jest przez grubsze warstwy, znajdujące się niżej.

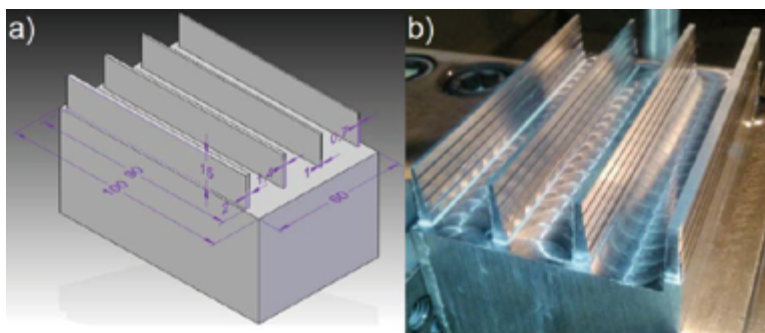
Przy obróbce zgrubnej elementów cienkościennych dla wszystkich strategii zalecane jest frezowanie przeciwbieżne. Na obróbkę wykończeniową należy pozostawić naddatek ok. $0,2 \div 1,0 \text{ mm}$, w zależności od końcowej grubości ścianki. W celu zmniejszenia ugięcia ścianki podczas obróbki, tak jak wspomniano wcześniej, należy stosować wysokie prędkości skrawania oraz mały stosunek a_p/a_e .

Zastosowanie powyższych strategii obróbki, mających na celu zapobieganie deformacjom cienkich 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 obrabioną powierzchnię co wpływa na przyspieszenie zużycia narzędzia oraz pogorszenie jakości obrabianej powierzchni.

Powyższe czynniki powodują, że coraz częściej zalecane jest wykonywanie obróbki wykończeniowej cienkich ścianek na pełnej ich wysokości [4, 13]. Wymaga to jednak stosowania narzędzi o odpowiedniej geometrii charakteryzującej się m.in. różną podziałką ostrzy oraz zmiennym lub różnym kątem pochylenia linii śrubowej (rys.10.4).

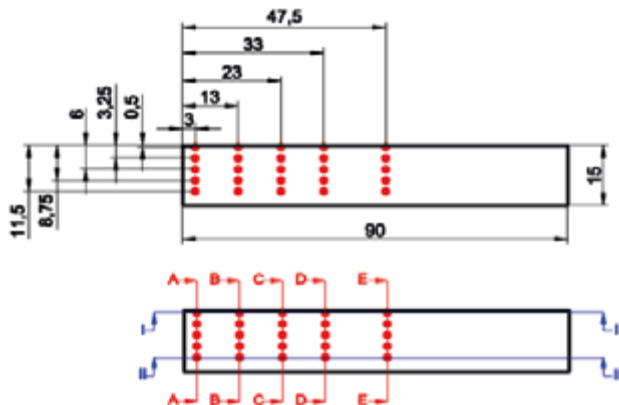
W celu porównania efektów obróbki elementów cienkościennych z zastosowaniem wyżej omówionych strategii, wykonano próby skrawania konstrukcji przedstawionych na rys. 10.9.



Rys. 10.9. Elementy cienkościenne wykonywane różnymi strategiami, a) model, b) element po obróbce z grubą strategią „choinki”

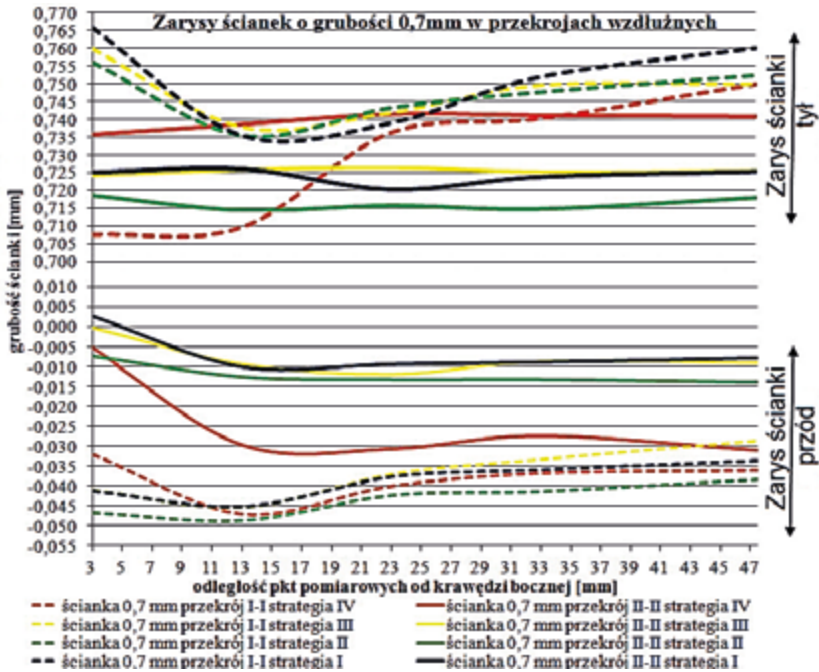
Wykonywane elementy miały postać neutwierdzonych prostopadłościennych ścianek o wysokości 15mm, długości 90mm i grubościach 2,0; 1,4; 1,0; 0,7mm. Jako przygotówkę zastosowano pręt walcowany ze stopu aluminium EN AW-6082 po obróbce cieplnej T351. Obróbkę skrawaniem wykonano frezem węglkowym niepowlekanym, dedykowanym do obróbki stopów z grupy ISO N o średnicy 12mm i ilości ostrzy $z=2$. Po obróbce zgrubnej z parametrami: $v_c=200$ m/min; $f_z=0,2$ mm/ostrze; $a_p=3$ mm, ścianki obrabiano wykończeniowo na pełnej wysokości w jednym przejściu z parametrami: $v_c=300$ m/min; $f_z=0,07$ mm/ostrze;

$a_e=0,2$ mm. Następnie w płaszczyznach i punktach przedstawionych na rys.10.10 wykonano pomiary dokładności wykonania gotowych ścianek.

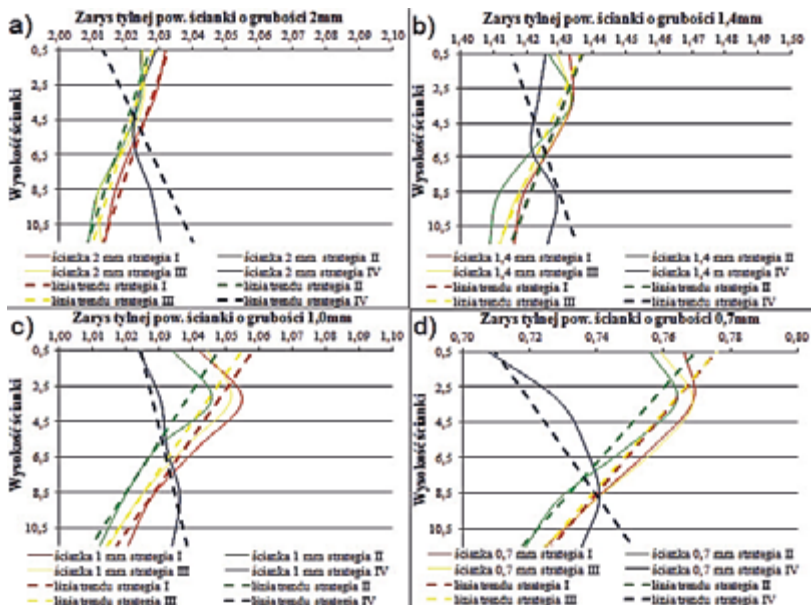


Rys. 10.10. Rozmieszczenie płaszczyzn i punktów pomiarowych na wykonanych ściankach

Na rys.10.11 przedstawiono zarysy ścianek o grubości 0,7mm w przekrojach wzdłużnych I-I i II-II. Wszystkie ścianki o grubości 0,7mm w przekroju II-II, czyli u ich podstawy, zarówno na powierzchni tylnej jak i przedniej, mają w przybliżeniu zarys prostoliniowy. W przekroju tym możemy zauważyć, że dla strategii IV ścianka ma większą grubość niż dla pozostałych strategii. Jest to prawdopodobnie spowodowane większym ugięciem narzędzia w trakcie obróbki, które wynika ze zwiększonego przekroju warstwy skrawanej. Jednocześnie przy tej strategii tylna powierzchnia ścianki, która była obrabiana jako pierwsza, ma inny zarys niż przy pozostałych strategiach, tzn. jest przechylona do wewnątrz przy górnej krawędzi ścianki, co jest dobrze widoczne na rys.10.12d. Wynika to z tego, że przy obróbce tylnej powierzchni ścianki strategią IV, w przeciwieństwie do pozostałych strategii, nie ulega ona odkształceniu sprężystemu ponieważ posiada zwiększoną sztywność w wyniku dodatkowego podparcia z przeciwnej strony. Zwiększona sztywność ścianki oraz przekrój warstwy skrawanej sprawiają, że większemu ugięciu ulega narzędzie. Z wykresu (rys.10.11) wynika, że ścianki odchylają się bardziej w przekroju skrajnym A-A. Dla przekroju tego na rys.10.12 przedstawiono zarysy ścianek o grubościach od 2,0mm do 0,7mm wykonanych różnymi strategiami.

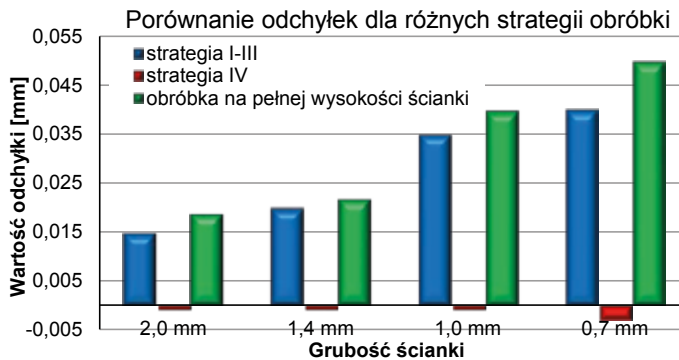


Rys. 10.11. Zarys ścianek o grubości 0,7mm w przekrojach I-I i II-II wykonanych różnymi strategiami



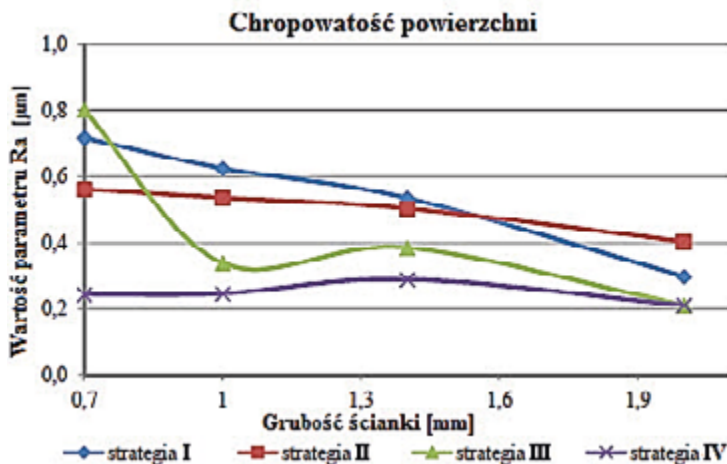
Rys. 10.12. Zarys ścianek w przekrojach A-A wykonanych różnymi strategiami i grubościach: a) 2,0mm; b) 1,4mm; c) 1,0mm; d) 0,7mm.

Zgodnie z rys.10.12, przy obróbce strategiami I – III ścianki o wszystkich przebadanych grubościach ulegają w trakcie obróbki sprężystemu ugięciu, co objawia się odchyleniem ich zarysu przy górnej krawędzi na zewnątrz. Odchylenie to rośnie wraz ze zmniejszeniem grubości ścianek, a więc spadkiem ich sztywności i dla pierwszych trzech strategii ma podobną wartość. Dla najgrubszej, 2,0mm ścianki (rys.10.12a), wynosi ok. 0,015mm, a dla najcieńszej 0,7mm (rys.10.12d) ok. 0,04mm. W przypadku strategii IV dla pierwszych 3 grubości ścianek od 2,0mm do 1,0mm ich zarys jest w przybliżeniu prostoliniowy – odchyłka nie przekracza 0,01mm. Dla najcieńszej ścianki o grubości 0,7mm odchylenie to jest znacznie większe i wynosi ok. 0,03mm. W przypadku tej strategii ścianki odchylone są w przeciwnym kierunku niż dla pozostałych strategii, co wynika z większej ich sztywności oraz ugięcia narzędzia. Ponadto maksymalne ugięcie, przy tej strategii, najcieńszej ścianki może sugerować, że uległa ona odkształceniom plastycznym. Na rys. 10.13 dla porównania przedstawiono wartości odchyłek zarysów ścianek wykonanych różnymi strategiami obróbki. Za względu na odmienny kierunek odchyłki zarysu ścianek dla strategii IV mają ujemną wartość (tzn. ścianka przy jej górnej krawędzi ugięta jest do wewnątrz konstrukcji). Na podstawie danych przedstawionych na wykresach (rys. 10.13) możemy uznać, że uzyskane wartości odchyłek dla strategii I-III i obróbki w jednym przejściu na pełnej wysokości są bardzo zbliżone. Dla strategii IV uzyskano znacznie mniejsze wartości odchyłek.



Rys. 10.13. Odchyłki zarysów powierzchni bocznych elementów cienkościennych wykonanych różnymi strategiami

Na rys. 10.14 przedstawiono porównanie chropowatości powierzchni dla ścianek o wszystkich przebadanych grubościach, wykonanych różnymi strategiami.



Rys. 10.14. Chropowość powierzchni elementów cienkościennych o różnych grubościach, wykonanych różnymi strategiami obróbki

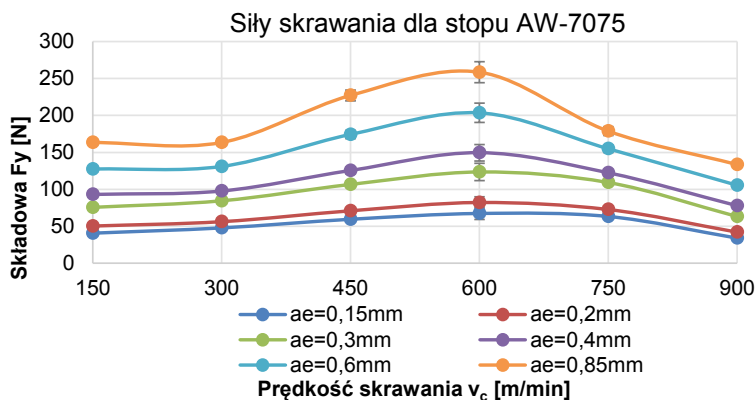
Widoczne jest pogorszenie jakości powierzchni dla strategii I – III, wraz ze spadkiem grubości ścianek, które wynika prawdopodobnie ze zmniejszonej stabilności obróbki i pojawienia się karbowania dla najmniejszej grubości ścianki. W przypadku strategii IV uzyskano najlepszą chropowość, o zbliżonych wartościach dla wszystkich grubości ścianek. Nieco większą chropowość uzyskano dla obróbki w jednym przejściu, jednak jest ona znacznie lepsza niż dla strategii I-III.

Analizując wyniki obróbki cienkich ścianek różnymi strategiami, zarówno pod kątem ich dokładności geometrycznej jak i jakości powierzchni, możemy stwierdzić, że najlepsze efekty obróbki uzyskano stosując strategię IV „choinki”. Strategie obróbki I-III w rozpatrywanych przypadkach dają gorsze rezultaty i są względem siebie porównywalne. Odchyłki zarysu dla obróbki w jednym przejściu mają zbliżone wartości do uzyskanych w strategiach I-III. Chropowość powierzchni dla obróbki w jednym przejściu jest znacznie niższa niż dla strategii I-III i zbliżona dla uzyskanej w strategii IV. Uwzględniając znacznie większą wydajność, w przypadku gdy wymagane odchyłki kształtu na to pozwalają, obróbka w jednym przejściu wydaje się być najlepszym rozwiązaniem.

Podsumowując, na wielkość odkształceń powstających w trakcie obróbki elementów cienkościennych, a tym samym dokładność ich wykonania można wpłynąć poprzez [1, 4, 12, 14]:

- dobór właściwej strategii obróbki,
- optymalizację prędkości skrawania (stosowanie podwyższonych prędkości skrawania – HSC),
- optymalizację parametrów warstwy skrawanej – zmianę posuwu f_z oraz głębokości a_p i szerokości a_e skrawania.

Ostateczny wybór strategii jest uzależniony od konkretnej sytuacji technologicznej. W wielu sytuacjach warto wykonać symulację odkształceń z wykorzystaniem MES. Pozwala to na znaczne skrócenie technologicznego przygotowania produkcji. Do wykonania obliczeń MES konieczna jest znajomość właściwości materiału modelu oraz warunków brzegowych obejmujących m.in. sposób utwierdzenia i obciążenia tego modelu.



Rys. 10.15. Siły skrawania dla różnych szerokości frezowania a_e w zależności v_c

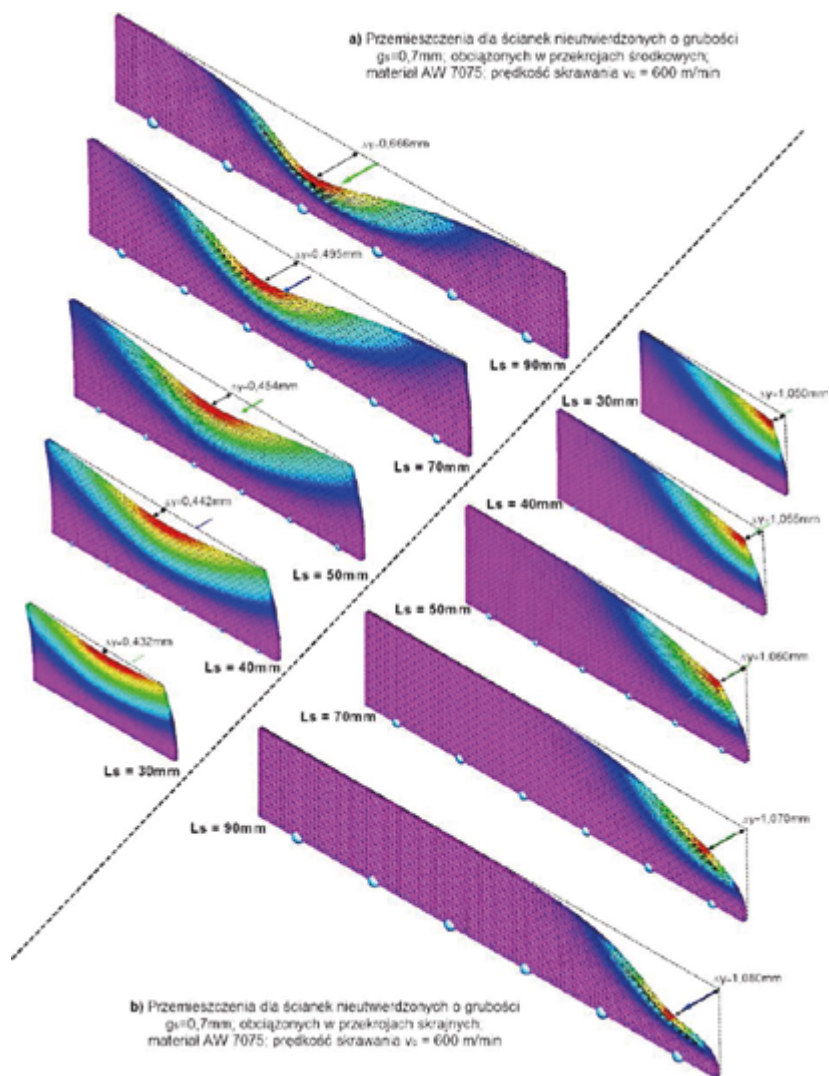
Na rys. 10.15 przedstawiono wartości siły skrawania dla stopu AW-7075 w zależności od prędkości i szerokości skrawania. Wyznaczone wartości sił skrawania posłużyły do obciążenia modeli elementów cienkościennych w sposób przedstawiony na rys. 10.16. W analizie MES zastosowano uproszczony model oddziaływania narzędzia na obrabiany przedmiot. Wzdłuż krzywej nachylonej pod kątem równym kątowi pochylenia krawędzi skrawającej przyłożono statyczną siłę, odpowiadającą zmierzonej sile skrawania. 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. 10.15):

- **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. 10.16. Modele obciążenia oraz utwierdzenia przyjęte w analizie MES: a) ścianek nieutwierdzonych, b) ścianek utwierdzonych

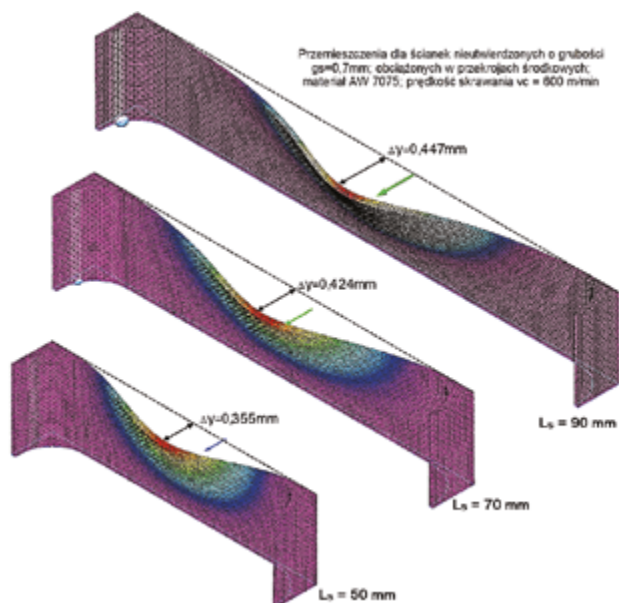
- Na powierzchni podstaw ścianek nałożono więzy odbierające możliwości ich przemieszczenia we wszystkich kierunkach, uzyskując w ten sposób pełne utwierdzenie modelu. Modele geometryczne ścianek poddano procesowi dyskretyzacji w programie NX Nastran dzieląc je na tetragonalne elementy skończone.
- Otrzymane wyniki umożliwiają obserwację rozkładów naprężenia i odkształcenia badanych konstrukcji cienkościennych. Poniżej przedstawiono przykładowe mapy rozkładu przemieszczenia dla dwóch typów ścianek: ścianki nieutwierdzone (rys. 10.17) oraz ścianki utwierdzone (rys. 10.18). W obydwu przypadkach wyniki obliczeń dotyczą odkształcenia ścianek o grubości $g_s = 0,7$ mm i różnych długościach L_s , wykonanych ze stopu AW-7075. W symulacjach ścianki obciążono maksymalną siłą skrawania (rys. 10.15), którą uzyskano dla prędkości skrawania $v_c = 600$ m/min. Dla ścianek nieutwierdzonych wyniki przedstawiono w dwóch przekrojach: środkowym (rys. 10.17a) i skrajnych (rys. 10.17b), natomiast dla ścianek utwierdzonych tylko w przekrojach środkowych, gdyż utwierdzenie ścianek na ich końcach powoduje, że przemieszczenie w przekrojach skrajnych jest pomijalnie małe.



Rys. 10.17. Przemieszczenie obliczone 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

W przekrojach środkowych ścianek nieutwardzonych (rys. 10.17a), wraz ze zwiększeniem ich długości, przemieszczenia zmieniają się od $\Delta y = 0,432$ do $\Delta y = 0,666\text{ mm}$ (ponad 50% wzrost). Dla przekrojów skrajnych (rys. 10.17b), można przyjąć, że przemieszczenia są stałe niezależnie od długości ścianki. Są one ponadto

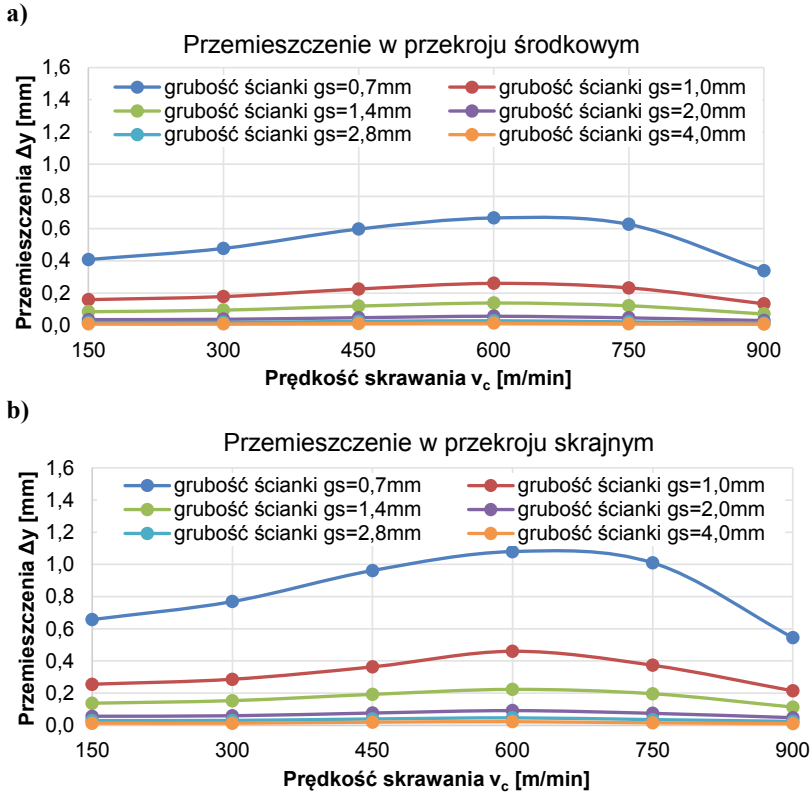
znacznie większe niż w przekrojach środkowych (np. dla najkrótszej ścianki $L_s = 30$ mm ponad 2-krotnie). Można zaobserwować (rys. 10.17), że przemieszczenie dla ścianek o $L_s = 30 \div 50$ mm, rozchodzi się na całych ich długościach, a dla ścianek $L_s = 70 \div 90$ mm i dłuższych obejmuje tylko ich środkową strefę. Przemieszczenie obejmuje swoim zasięgiem ok. 35 mm długości ścianki.



Rys. 10.18. *Przemieszczenie obliczone 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*

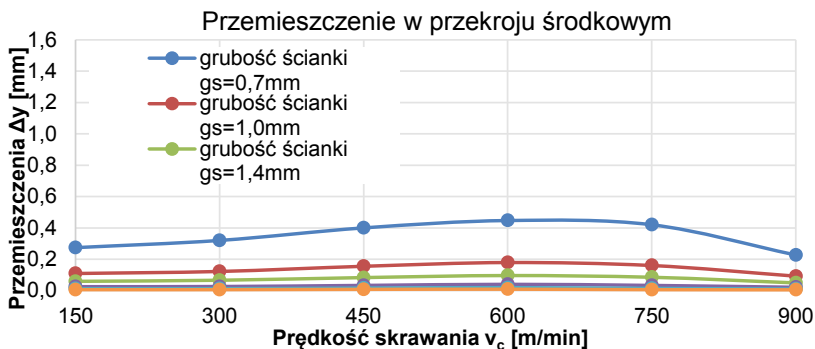
Podobnie jak dla ścianek nieutwardzonych (rys. 10.17 a) wartości przemieszczenia ścianek utwardzonych (rys. 10.18) rosną wraz ze wzrostem ich długości. Jednak wzrost ten nie jest tak duży jak dla ścianek nieutwardzonych. W zakresie długości ścianek utwardzonych $L_s = 50 \div 90$ mm wynosi on maksymalnie ok. 25%, gdy dla ścianek nieutwardzonych, w tym zakresie długości, osiąga ok. 50%.

Na rys. 10.19 można zaobserwować, że obliczone przemieszczenie dla ścianek nieutwardzonych o grubościach w zakresie $g_s = 2 \div 4$ mm jest pomijalnie małe. Wyraźny wzrost wartości przemieszczenia występuje dla ścianek o grubości mniejszej niż $g_s = 1,4$ mm. Największe wartości przemieszczenia otrzymano dla ścianek o najmniejszej grubości, tj. $g_s = 0,7$ mm. Ze względu na zmianę wartości sił skrawania, przemieszczenie zależy również od prędkości skrawania. Największa wartość przemieszczenia odpowiada granicznej prędkości skrawania między obróbką konwencjonalną a obróbką HSC.



Rys. 10.19. Przemieszczenie ścianek neutwierdzonych w przekroju: a) środkowym, b) skrajnym

Na podstawie rys. 10.19 można stwierdzić, że wartości przemieszczenia w przekrojach skrajnych, w zależności od prędkości skrawania, są ok. 30÷50 % większe niż w przekrojach środkowych. Największe różnice otrzymano dla granicznej prędkości skrawania.



Rys. 10.20. Przemieszczenie w przekrojach środkowych ścianek utwierdzonych

Dla porównania na rys. 10.20 przedstawiono zmiany wartości przemieszczenia ścianek utwierdzonych o różnej grubości i długości $L_s = 90$ mm, w zależności od prędkości skrawania. Dla ścianek utwierdzonych o grubości $g_s = 1,0 \div 4,0$ mm wartości przemieszczenia w przekrojach środkowych zmieniają się w niewielkim zakresie, a ich maksymalna wartość nie przekracza $\Delta y = 0,2$ mm. Wyraźny wzrost wartości przemieszczeń widoczny jest dla najcieńszej ścianki o grubości $g_s = 0,7$ mm. Można zaobserwować, że przemieszczenia w przekrojach środkowych ścianek utwierdzonych, w porównaniu do ścianek nieutwierdzonych o takich samych parametrach geometrycznych, są w zależności od długości ścianki ok. 15÷30% mniejsze.

Analizując powyższe wykresy możemy stwierdzić, że zarówno dla ścianek utwierdzonych jak i nieutwierdzonych, 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 przemieszczenia. Przemieszczenie obliczone dla największej zastosowanej prędkości $v_c = 900$ m/min, osiąga wartości zbliżone do uzyskanych dla najmniejszej prędkości $v_c = 150$ m/min. Jest to bardzo korzystne, gdyż dla większych prędkości skrawania, zapewniających wyższą wydajność, można uzyskać podobne efekty jak dla prędkości skrawania z zakresu obróbki konwencjonalnej.

Warto zwrócić uwagę, że zarówno dla ścianek utwierdzonych i nieutwierdzonych, porównując różnice w odkształceniach w środkowej części ścianki, można zauważyć tendencję 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.

Literatura

1. Boeing, *High Speed Machining Aluminum*, 2008, Boeing Technology.
2. Burek J., Płodzień M.: *Wysoko wydajna obróbka części ze stopów aluminium o złożonych kształtach*. „Mechanik” 7/2012, s. 542-549.
3. Gang L.: *Study on deformation of titanium thin-walled part in milling process*. „Journal of Materials Processing Technology” 209(6)/2009, s. 2788-2793.
4. LMTFette: *DHC siła tkwi w spokoju*. „Materiały informacyjne firmy LMT Fette”.
5. Oczó K.E.: *Kierunki zwiększania produktywności procesów skrawania*. „Mechanik” 5-6 /2007, s. 325-348.
6. Pieško P., Zagórski I.: *Analiza dokładności obróbki, frezami trzpieniowymi o zmiennej sztywności, tulei cienkościennych wykonanych z stopu AlMn1*. „Innowacyjne procesy chnologiczne” / 2011, s. 33-46.

7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Robertson E.: *Defining new directions in virtual machining*. Shop Metalworking Technology. <http://www.shopmetaltech.com>.
12. Sandvik: *Poradnik obróbki skrawaniem*. Sandvik. Szwecja, 2007.
13. Tools S.S.C.: *Materiały informacyjne firmy SGS.* ” /2013.
14. Zębala W.: *Minimalizacja błędów obróbki przedmiotów cienkościennych*. „Inżynieria Maszyn” 3/2010, s. 45-54.

11. Frezowanie konstrukcji kieszeniowych frezami trzpieniowymi o różnej sztywności

Konstrukcje kieszeniowe są bardzo często stosowane w elementach struktur lotniczych (rys. 11.1). Mają one postać elementów cienkościennych o skomplikowanej geometrii oraz znacznej głębokości wybrań. Ich obróbka wymaga stosowania „smukłych” narzędzi o dużych wysięgach, a co za tym idzie małej sztywności. Przy jednoczesnej konieczności zapewnienia dużej wydajności, wiąże się to z powstawaniem odkształceń zarówno narzędzia jak i przedmiotu obrabianego, które wpływają na dokładność wykonania obrabianych ścianek, co szerzej omówiono w rozdziale 10.



Rys. 11.1. Przykłady konstrukcji kieszeniowych zastosowanych w elementach strukturalnych statków powietrznych [6, 9]

Zwiększenie wysięgu narzędzia można uzyskać przez zastosowanie oprawek o odpowiednich długościach lub narzędzi o wydłużonej części chwytowej. W przypadku obróbki szybkościowej HSC stosowane są głównie monolityczne narzędzia węglukowe oraz oprawki termokurczliwe zapewniające pewność i dokładność mocowania. Przykłady takich rozwiązań przedstawiono na rys. 11.2.

Zarówno wydłużenie oprawki jak i narzędzia wpływa na obniżenie sztywności układu narzędzie-oprawka-wrzeciono i może powodować zmniejszenie dokładności i jakości obróbki. Dla obróbki HSC, szczególnie przy zwiększonym wysięgu narzędzia, decydujące znaczenie ma jego wyważenie dynamiczne. Złe wyważenie, podobnie jak mała sztywność narzędzia, mogą być przyczyną utraty jego stabilności podczas pracy oraz niekorzystnie wpływają na układ łożyskowania wrzeciona.



Rys. 11.2. Przykłady narzędzi o różnych wysięgach [1]

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

$$j_x = \frac{F_x}{\Delta x} \quad j_y = \frac{F_y}{\Delta y} \quad j_z = \frac{F_z}{\Delta z} \quad (11.1)$$

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:

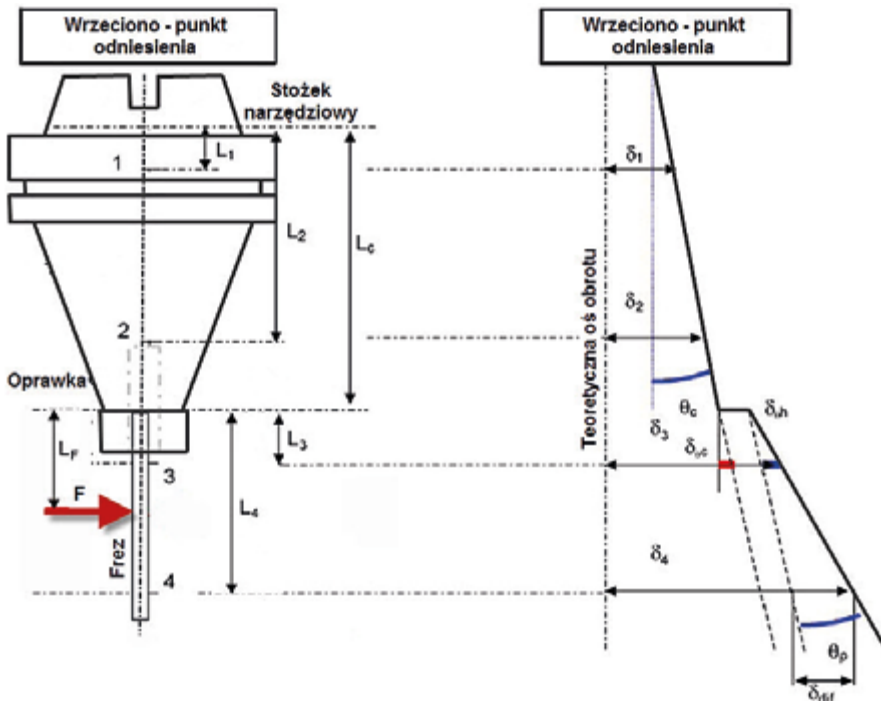
$$j_M = \frac{M_c}{\Delta\varphi} \quad (11.2)$$

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:

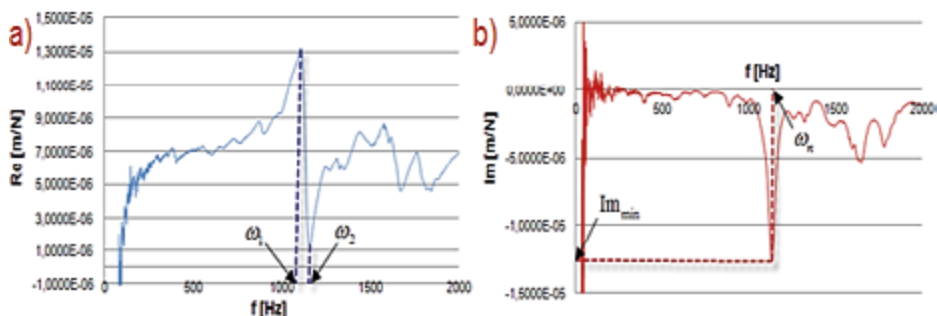
$$C_d = \frac{F_0}{|X(j\omega)|} \quad (11.3)$$

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



Rys. 11.3. Odkształcenia układu narzędzie-oprawka-wrzeciono. Poszczególne oznaczenia wymiarów odnoszą się do długości (L_1 , L_2 , L_3 , L_4) oprawki, narzędzia itp. oraz sumarycznych odkształceń (δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4) wrzeciona, oprawki i narzędzia. [7]

Wzrost długości wysięgu narzędzia powoduje obniżenie jego sztywności, a tym samym zwiększenie odkształceń w trakcie obróbki pod wpływem sił skrawania. Odkształceniemu ulega jednak nie tylko samo narzędzie lecz cały układ narzędzie–oprawka–wrzeciono (rys. 11.3). Trudne byłoby więc wyznaczenie zarówno odkształceń jak i sztywności tak skomplikowanego układu. Wyznaczenie sztywności jest możliwe z zastosowaniem analizy modalnej, po odczytaniu odpowiednich danych z wykresów charakterystyk dynamicznych (rys. 11.4), oraz niezbędnych obliczeniach.



Rys. 11.4. Przykładowa odpowiedź układu narzędzie-oprawka-wrzeciono na wymuszenie: a) część rzeczywista, b) część urojona [4]

Współczynnik tłumienia można wyznaczyć z zależności [2]:

$$\zeta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_n} \quad (11.4)$$

gdzie: ζ – współczynnik tłumienia

$\omega_1, \omega_2, \omega_n$ – częstotliwości wyznaczone z przebiegów rys.11.4

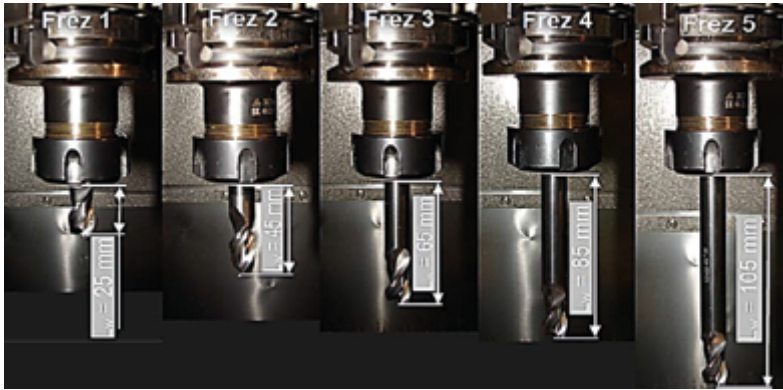
a następnie sztywność wyznacza się z zależności [2]:

$$j = \frac{-1}{2\zeta Im_{min}} [\text{N/m}] \quad (11.5)$$

gdzie: j – sztywność,

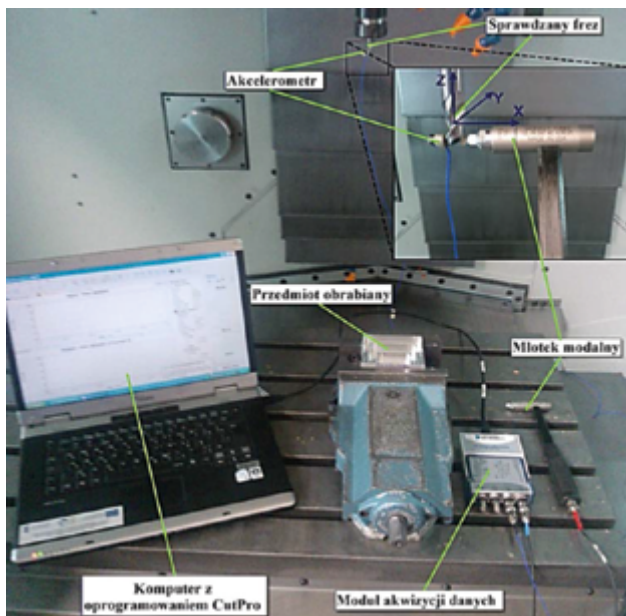
Im_{min} – wartość części urojonej odpowiadająca częstotliwości (rys.11.4b).

Dla frezów o różnej długości (rys. 11.5), zamocowanych w uchwytach narzędziowych z tulejkami sprężystymi w standardzie ER i wyważonych w klasie G2,5 dla 25 000 obr/min wg. ISO 1940:2003 [3], wyznaczono sztywność układu narzędzie–oprawka–wrzeciono z zastosowaniem analizy modalnej.



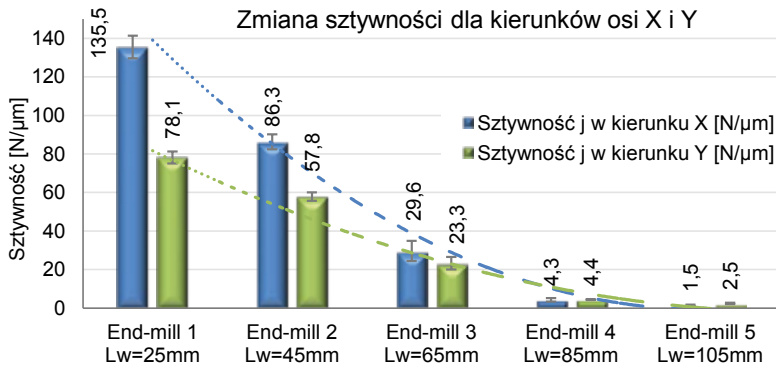
Rys. 11.5. Widoki narzędzi o różnej długości wysięgów zamocowanych we wrzecionie obrabiarki

W celu wyznaczenia charakterystyk dynamicznych tego układu posłużono się zestawem do eksperymentalnej analizy modalnej przedstawionym na rys. 11.6, który pozwala na pomiar wartości siły wymuszającej oraz odpowiedzi układu na to wymuszenie. Na podstawie tych pomiarów wyznaczana jest charakterystyka częstotliwościowa badanego układu. 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.



Rys. 11.6. Zestaw do analizy modalnej

Wykorzystując dane otrzymane na podstawie odpowiedzi układu na wymuszenie dynamiczne (rys. 11.4), z zależności 11.5 wyznaczono wartości sztywności w dwu kierunkach X i Y odpowiadających osiom X i Y układu współrzędnych obrabiarki CNC. Wyniki pomiarów sztywności przedstawiono na rys. 11.7.



Rys. 11.7. Zmiana sztywności „modalnej” układu narzędzie–oprawka–wrzeciono w zależności od długości wysięgu narzędzia dla dwu kierunków pomiaru: X i Y

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. 11.7). 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. 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.

Znając wartości sztywności układu narzędzie–oprawka–wrzeciono (rys. 11.7) oraz wartości sił obciążających ten układ (rys. 3.7) można wyznaczyć teoretyczną wartość ugięcia frezów pod wpływem sił skrawania. Ugięcie to wyliczono dla kierunku Y o mniejszej sztywności, przekształcając zależności (11.1):

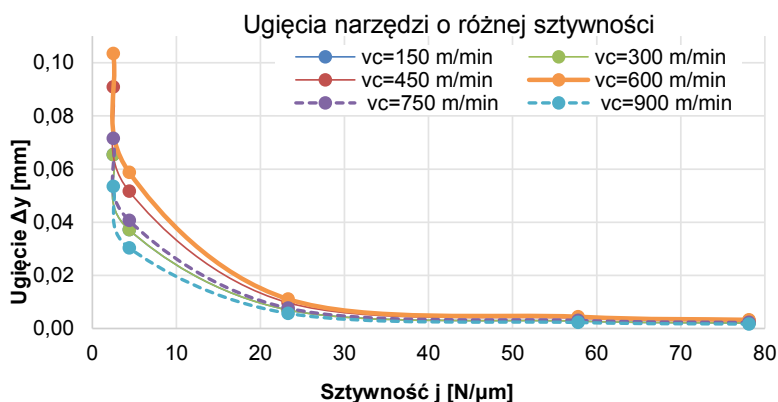
$$j_y = \frac{F_y}{\Delta y} \left[\frac{N}{\mu m} \right] \Rightarrow \Delta y = \frac{F_y}{j_y} [\mu m] \quad (11.6)$$

Wyniki obliczeń ugięcia układu narzędzie-oprawka-wrzeciono w zależności od jego sztywności i obciążenia siłami skrawania odpowiadającymi prędkościom skrawania z zakresu $v_c = 150 \div 900$ m/min przedstawiono w tabeli 11.1 i na rys. 11.8. Siły skrawania zmierzono w trakcie frezowania wykończeniowego stopu EN AW-7075 z głębokością skrawania $a_p = 15$ mm i szerokością frezowania $a_e = 0,85$ mm.

Tabela 11.1. Wyniki obliczeń ugięcia narzędzi o różnej sztywności

Sztywność j [N/ μ m]	Ugięcie narzędzia Δy [mm]					
	$v_c=150$ m/min	$v_c=300$ m/min	$v_c=450$ m/min	$v_c=600$ m/min	$v_c=750$ m/min	$v_c=900$ m/min
$j=78,1$ N/ μ m	0,002	0,002	0,003	0,003	0,002	0,002
$j=57,8$ N/ μ m	0,003	0,003	0,004	0,004	0,003	0,002
$j=23,3$ N/ μ m	0,007	0,007	0,010	0,011	0,008	0,006
$j=4,4$ N/ μ m	0,037	0,037	0,052	0,059	0,041	0,030
$j=2,5$ N/ μ m	0,065	0,065	0,091	0,103	0,072	0,053

Na rys. 11.8 można zaobserwować, że obliczone ugięcie narzędzi o sztywności z zakresu $j = 23,3 \div 78,1$ N/ μ m zmienia się w niewielkim stopniu. Wyraźny wzrost ugięcia występuje dla narzędzi o najmniejszej sztywności, tzn. $j = 2,5 \div 4,4$ N/ μ m. Ugięcie układu narzędzie-oprawka-wrzeciono przekłada się na dokładność wykonania obrabianych konstrukcji kieszeniowych. Ich obrobione powierzchnie boczne zamiast zarysu prostoliniowego są pochylone.

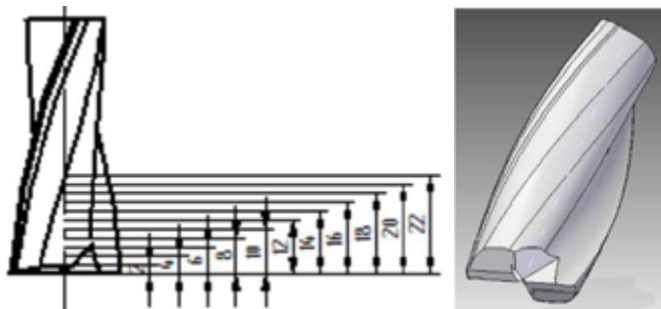


Rys. 11.8. Wartości ugięcia narzędzi o różnej sztywności dla wybranych prędkości skrawania v_c

Otrzymane wyniki obliczeń nie mogą być jednak przyjęte jako rzeczywiste wartości ugięcia układu narzędzie-oprawka-wrzeciono podczas obróbki, gdyż nie uwzględniają złożoności procesu skrawania (m.in. dynamiki procesu). Przedstawiają jedynie war-

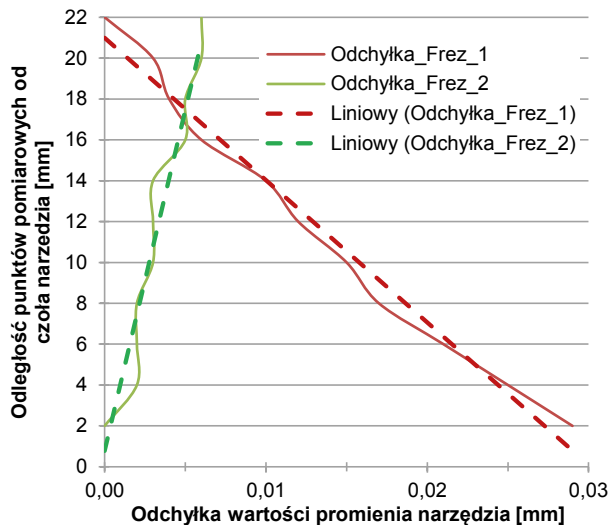
tość odkształcenia narzędzia pod wpływem statycznej siły będącej estymatą rzeczywistej siły skrawania. Dają jednak pogląd o możliwej wartości ugięcia narzędzia, które może wynosić nawet powyżej $\Delta y_N = 0,11$ mm. Wyliczone ugięcie nie może również być równoznaczne z wartością pochylenia obrabianych powierzchni. Na wartość tego pochylenia wpływa wiele czynników, oprócz ugięcia układu narzędzie-oprawka-wrzeciono są to m.in. ugięcie obrabianych cienkościennych konstrukcji kieszeniowych, naprężenia własne i poobróbkowe, błędy geometrii narzędzia, itp.

W celu sprawdzenia wpływu błędów wykonania narzędzia na dokładność obrabianych elementów wykonano pomiary promienia dwu takich samych frezów. Widok tych narzędzi z naniesionymi płaszczyznami pomiaru przedstawiono na rys. 11.9.



Rys. 11.9. Widok geometrii mierzonych narzędzi [5]

Płaszczyzny pomiarowe rozmieszczono co 2 mm od czoła narzędzia (rys. 11.9). Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 11.10.

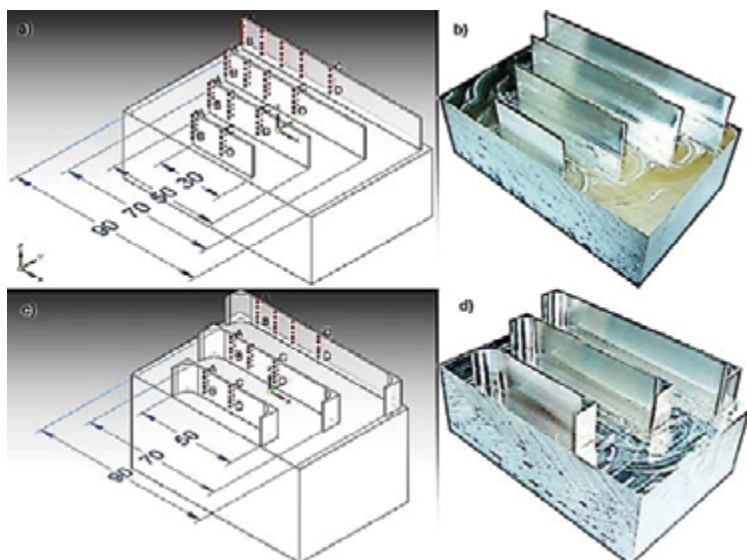


Rys. 11.10. Zmiana wartości promienia narzędzia [5]

Można stwierdzić, że pierwszy frez jest zbieżny w kierunku części chwytowej natomiast drugi w kierunku jego czoła. W przypadku drugiego narzędzia zbieżność ta jest nieznaczna (0,006 mm) w odróżnieniu do narzędzia pierwszego dla którego wynosi 0,03 mm na długości 22 mm. Zmiana promienia narzędzia przekłada się na dokładność wykonania gotowych elementów. W przypadku frezu 1 błąd wykonania narzędzia będzie sumował się z ugięciem układu narzędzie-oprawka-wrzeciono wpływając na zwiększenie powstających błędów obróbki.

W celu określenia wpływu zmian sztywności układu narzędzie-oprawka-wrzeciono, w przypadku zmiany długości narzędzia, wykonano próby skrawania elementów cienkościennych. 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 spotykane w tego typu elementach. Stosowane w przemyśle grubości ścianek są z reguły większe niż 2mm, lecz ciągłe dążenie do zmniejszania masy wytwarzanych elementów wymusza obniżenie tej wartości. Było to powodem zastosowania w badaniach ścianek o grubościach znacznie niższych niż stosowane obecnie. Dla najmniejszych grubości ścianek tzn. 1mm i 0,7mm stosunek ich wysokości do grubości jest wyższy od 15. Wartość ta, według danych literaturowych, może być traktowana jako graniczna, powyżej której występują trudności z obróbką.

Widoki modeli ścianek wraz z naniesionymi punktami pomiarowymi przedstawiono na rys. 11.11 a i c. Natomiast rys. 11.11 b i d przedstawiają przykładowe widoki rzeczywistych próbek.



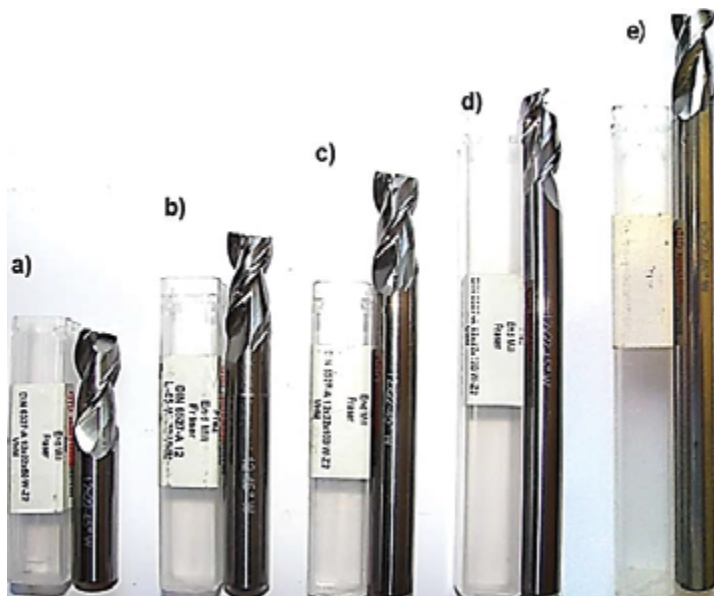
Rys. 11.11. Modele i widoki próbek ze ściankami: a), b) nieutwierdzonymi; c), d) utwierdzonymi

W trakcie przeprowadzonych prób stosowano prędkości skrawania z zakresu HSC (*ang. High Speed Cutting*), dlatego konieczne było zastosowanie narzędzi pozwalających na taką obróbkę. W badaniach zastosowano dwuostrzowe frezy trzpieniowe, węglukowe bez powłoki narzędziowej (rys. 11.12), o średnicy części roboczej $D_c=12\text{mm}$ i geometrii przystosowanej do wysokowydajnej obróbki stopów grupy ISO N (stopy Al, Mg, Cu). Wszystkie frezy miały identyczną geometrię ostrzy i różniły się jedynie długością, która zmieniała się od 60 mm do 140 mm, co 20 mm. Zestawienie podstawowych parametrów geometrycznych narzędzi przedstawiono w tabeli 11.2.

Tabela 11.2. Zestawienie parametrów geometrycznych narzędzi zastosowanych do badań

Parametry geometryczne stałe dla wszystkich narzędzi					
Ilość ostrzy z_n	Średnica D_c [mm]	Dł. części roboczej a_p [mm]	Kąt pochylenia linii śrubowej λ_s	Kąt przyłożenia α_o	Kąt natarcia γ_o
2	12	22	45°	12°	15°

Widoki narzędzi o różnej długości zamocowanych we wrzecionie obrabiarki przedstawiono na rys. 11.5. Frezy posiadały „ostrą” geometrię (duże kąty natarcia $\gamma_o=15^\circ$ i przyłożenia $\alpha_o=12^\circ$), która ułatwia dekohezję materiału (oddzielanie wióra).



Rys. 11.12. Widoki zastosowanych frezów o długości: a) 60, b) 80, c) 100, d) 120, e) 140mm

Obróbkę przeprowadzono w dwu etapach:

- Obróbka zgrubna – dla wszystkich prób zastosowano frez R216.32-12030-AC22A H10F firmy Sandvik [8] oraz parametry obróbki podane w tabeli 12.3.
- Obróbka wykończeniowa – zastosowano wcześniej opisane frezy o różnej długości firmy Fenes. Parametry obróbki wykończeniowej podano w tabeli 11.3. Zastosowano stały posuw na ostrze $f_z=0,07\text{mm/ostre}$ (ok. 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_e . Zastosowano stałą względną szerokość skrawania równą ok. 15% wyjściowej grubości ścianek.

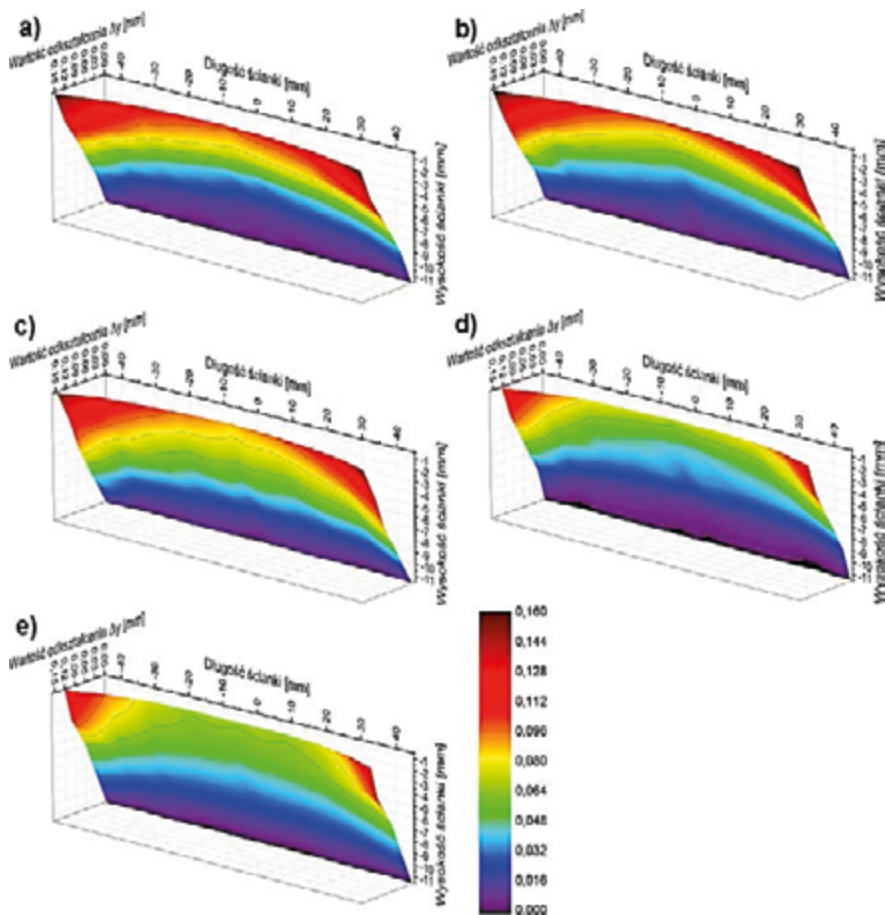
Tabela 11.3. Zestawienie parametrów obróbki zgrubnej i wykończeniowej

Parametry obróbki zgrubnej					
Prędkość skrawania	Prędkość obrotowa	Posuw na ostrze	Prędkość posuwu	Głębokość skrawania	Szerokość frezowania
v_c [m/min] n_f [obr/min]	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		

Pomiary geometrii ścianek w punktach przedstawionych na 11.11 a i c pozwoliły na wyznaczenie ich odchyłek kształtu oraz zarysu powierzchni bocznych.

Na rys. 11.13 przedstawiono zarysy powierzchni bocznych ścianek nieutwierdzonych, o długości $L_s = 90$ mm i grubości $g_s = 0,7$ mm, obrobionych z prędkością skrawania $v_c = 600$ m/min, narzędziami o różnej sztywności. Wybrano ścianki

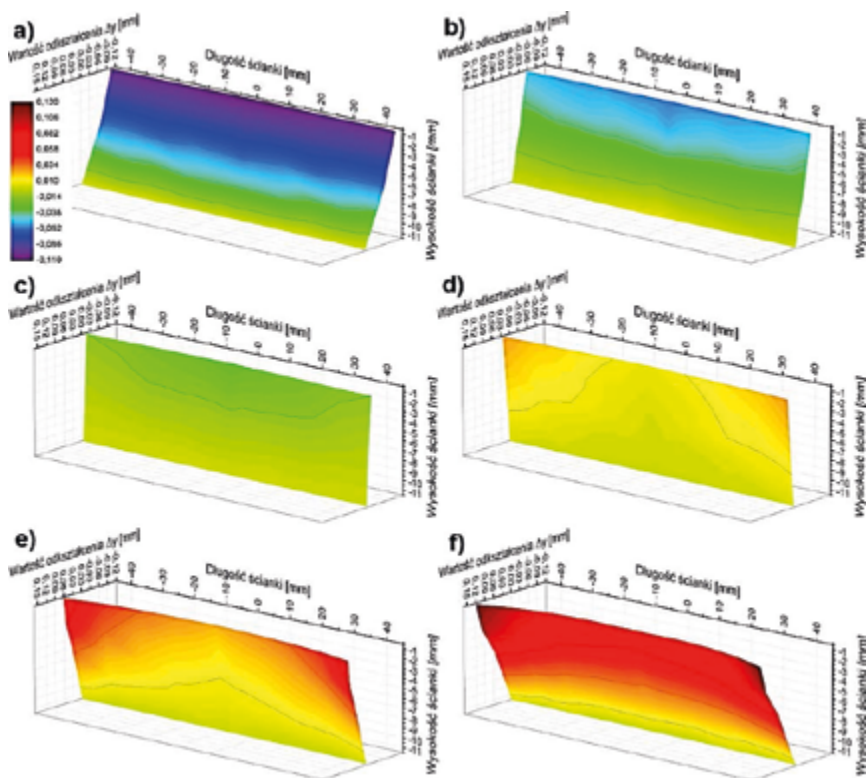
obrabiane z prędkością $v_c = 600$ m/min, ponieważ dla stopu EN AW-7075 przy tej prędkości występują największe siły skrawania (rys. 11.15). Analizując kształty powierzchni bocznych ścianek przedstawionych na rys. 11.13 można zaobserwować, że największe odkształcenia uzyskano podczas obróbki narzędziami o największej sztywności $j = 72,0$ N/ μm oraz $j = 106,8$ N/ μm (rys. 11.13 a i b). Obniżona sztywność narzędzi zwiększa ich ugięcie w trakcie obróbki, co przekłada się na obniżenie wartości odkształcenia ścianek.



Rys. 11.13. Zarys powierzchni bocznej ścianek nieutwierdzonych 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/ μm , b) 72 N/ μm , c) 26,4 N/ μm , d) 4,3 N/ μm , e) 2,0 N/ μm

Na wartość ugięcia układu narzędzie-oprawka-wrzeciono decydujący wpływ mają wartości siły skrawania, która zmienia się w zależności od przekroju warstwy skrawanej. Ponieważ w rozpatrywanym przypadku zastosowano stałą względną

szerokość frezowania to jej wartość malała wraz ze zmniejszaniem grubości ścianek g_s . Na rys. 11.14 przedstawiono zarysy powierzchni bocznych ścianek o różnej grubości wykonanych ze stopu EN AW-7075 frezem o najmniejszej sztywności. Ścianki o grubości w zakresie $g_s = 2 \div 4$ mm mają w przekrojach poprzecznych trapezowy zarys, a ich odkształcenie ma wartości ujemne.

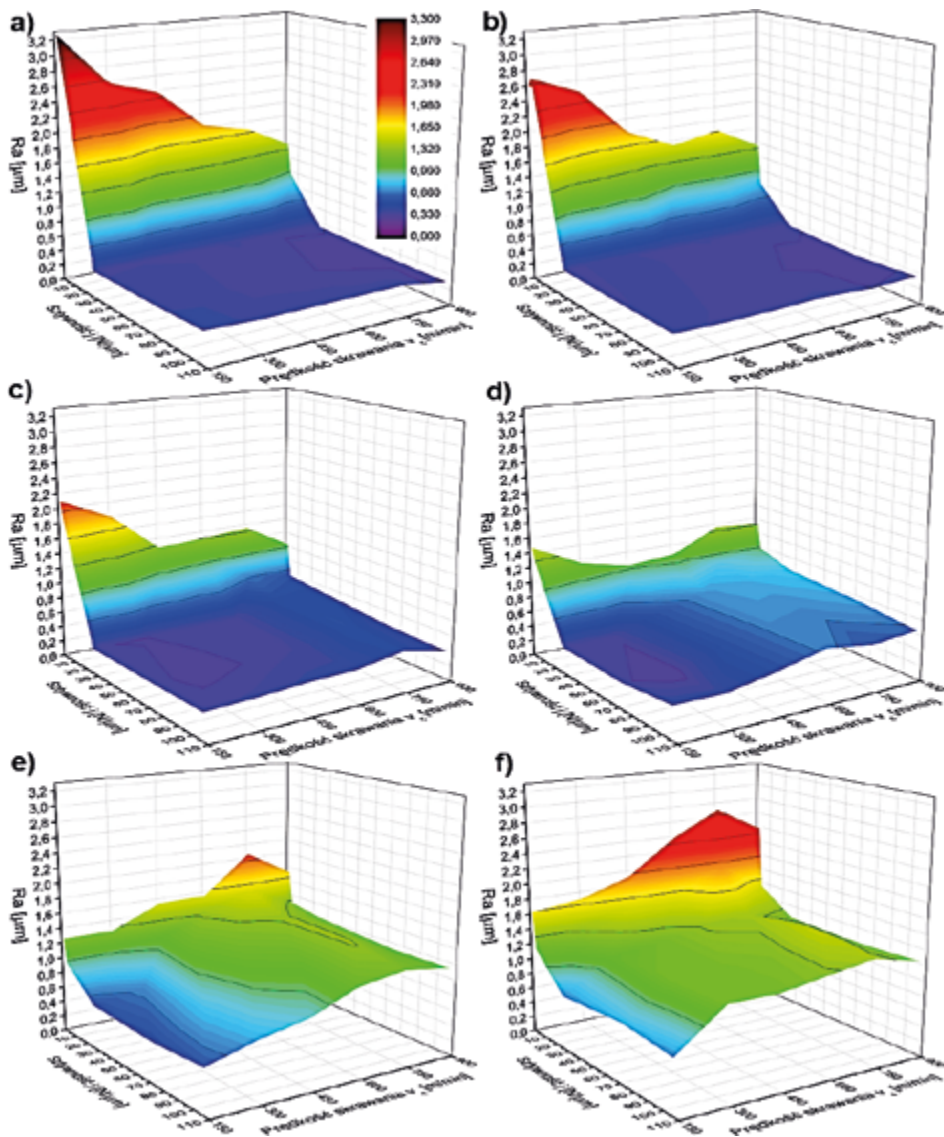


Rys. 11.14. Zarys powierzchni bocznej ścianek neutwierdzonych o długości $L_s=90$ mm; materiał EN AW-7075; prędkość skrawania $v_c=600$ m/min; sztywność narzędzia $j=2,0$ N/ μ m; grubość ścianek g_s : a) 4,0 mm, b) 2,8 mm, c) 2,0 mm, d) 1,4 mm, e) 1,0 mm, f) 0,7 mm

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. Opisany przebieg zmian wartości odkształcenia wraz ze 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, 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 ugięciu w trakcie obróbki, a kształt ich powierzchni bocznych wynika tylko z ugięcia narzędzia.



Rys. 11.15. Chropowatość 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

Obniżenie sztywności narzędzia może być również przyczyną utraty jego stabilności, co objawia się pogorszeniem jakości obrabianych powierzchni. Na rys. 11.15

przedstawiono wyniki pomiarów chropowatości powierzchni bocznych ścianek wykonanych narzędziami o różnej sztywności. Możemy zaobserwować, że dla poszczególnych grubości ścianek zmiany chropowatości, w zależności od prędkości skrawania, w zakresie sztywności narzędzi $j = 26,4 \div 106,8 \text{ N}/\mu\text{m}$, mają podobny charakter. Dla grubości ścianek $g_s = 2,8 \div 4 \text{ mm}$, 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 $g_s = 0,7 \div 2 \text{ mm}$, chropowatość zwiększa się. Jednak jej wartości w obrębie poszczególnych grubości ścianek, dla sztywności narzędzi $j = 26,4 \div 106,8 \text{ N}/\mu\text{m}$ i dla tych samych prędkości skrawania są zbliżone. Natomiast podczas obróbki narzędziami o sztywności $j = 2,0 \div 4,3 \text{ N}/\mu\text{m}$, dla wszystkich grubości ścianek, występuje znaczący wzrost chropowatości wraz ze spadkiem sztywności narzędzi. Dla największych grubości ścianek $g_s = 2 \div 4 \text{ mm}$ i najmniejszych prędkości, w wyniku utraty stabilności narzędzi, uzyskano najwyższą chropowatość. Maleje ona wraz ze wzrostem prędkości skrawania (rys. 11.15 a÷c). Dla grubości ścianek $g_s = 0,7 \div 1,0 \text{ mm}$, wraz ze wzrostem prędkości skrawania w zakresie $v_c = 150 \div 750 \text{ m}/\text{min}$ 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.

Podsumowując można stwierdzić, że wartość stosunku L/d narzędzia, a więc jego sztywności, w znaczący sposób wpływa na dokładność geometryczną oraz jakość powierzchni obrabianych przedmiotów. Jest to szczególnie istotne w przypadku elementów cienkościennych, które w trakcie obróbki mogą ulegać znacznym odkształceniom zarówno plastycznym jak i sprężystym. Powstające siły skrawania powodują wzajemne odpychanie narzędzia i przedmiotu obrabianego, a więc ich odkształcenie. W przypadku narzędzia odkształcenie to rośnie w miarę spadku jego sztywności oraz wzrostu przekroju warstwy skrawanej (wzrostu oporów skrawania). Konieczne jest więc stosowanie zmniejszonych przekrojów warstwy skrawanej oraz właściwej technologii i strategii obróbki.

W przypadku elementów o znacznych rozmiarach należy także uwzględnić wpływ sposobu ustalenia i mocowania przedmiotu.

Literatura

1. Boeing, *High Speed Machining Aluminum*, 2008, Boeing Technology.
2. Ewins D.J.: *Modal Testing: Theory and Practice*. Research Studies Press. Letchworth, England, 1984.

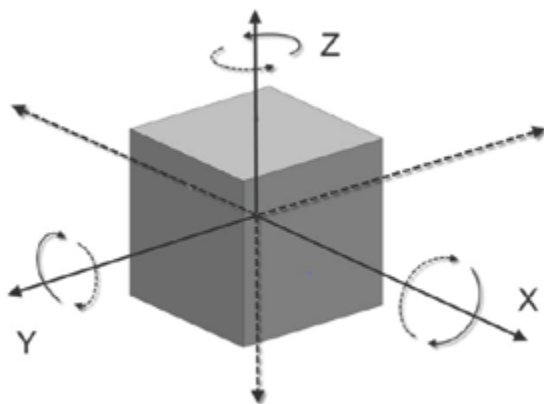
3. Normy, ISO 1940:2003 – *Drgania mechaniczne – Wyważanie wirników sztywnych. Wyznaczenie dopuszczalnego niewyważenia resztkowego.*, 2003.
4. Pieśko P.: *Opracowanie zaleceń w zakresie doboru technologicznych parametrów obróbki „ciągliwych” stopów Al dla różnych l/d frezów trzpieniowych.* „Raport z badań w ramach projektu: „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” /2010.
5. Pieśko P., Zagórski I., *Analiza dokładności obróbki, frezami trzpieniowymi o zmiennej sztywności, tulei cienkościennych wykonanych z stopu AlMn1* in *X Konferencja naukowo – techniczna „Technologiczne systemy informacyjne w inżynierii produkcji i kształceniu technicznym”*2011: Kazimierz Dolny
6. Pradeep P.: *Defect Identification in GRID-LOCK® Joints. A dissertation to the Graduate Faculty of North Carolina State University.* North Carolina State University, 2006.
7. 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.
8. Sandvik: *Poradnik CoroGuide.* Sandvik. Szwecja, 2007.
9. Stuart B.: *New Airframe Construction Techniques Lowers Both Manufacturing and In-Service Costs.* „Metal Miner” /March 29,2010.

12. Ustalanie i mocowanie elementów w procesie obróbki

Nowoczesna obróbka elementów stosowanych w lotnictwie wymaga zastosowania nie tylko nowoczesnych materiałów narzędziowych i wieloosiowych centrów obróbkowych, ale również niejednokrotnie innowacyjnego podejścia w zakresie zamocowania przedmiotu. Nadanie obrabianej części ściśle określonego położenia w przestrzeni obróbkowej jest jednym z najważniejszych zagadnień, z jakimi należy się zmierzyć opracowując proces technologiczny.

12.1. Istota ustalenia i zamocowania elementów lotniczych na obrabiarkach CNC

Proces decyzyjny dotyczący sposobu bazowania i zamocowania przedmiotu ma niejednokrotnie największy wpływ na dokładność jego obróbki i istotnie wpływa na całkowity czas operacji a tym samym koszt produkcji.



Rys. 12.1. Stopnie swobody przedmiotu w przestrzeni obróbki

Każdy przedmiot znajdujący się w przestrzeni obróbkowej powinien być ustawiony w sposób pewny poprzez odpowiednie jego **ustalenie i zamocowanie**. Każdy przedmiot swobodnie umieszczony w przestrzeni obróbkowej posiada

6 stopni swobody (rys. 12.1). Poprzez **ustalenie** możliwe jest nadanie przedmiotowi założonego przez technologa położenia w przestrzeni obróbkowej w tych kierunkach, które w sposób decydujący wpływają na uzyskanie pożądanego dokładności wymiarowo – kształtowej.

Elementy uchwytu lub oprzyrządowania, które służą do ustalania położenia przedmiotów obrabianych noszą nazwę elementów ustalających.

Do ustalenia położenia przedmiotu można wykorzystywać powierzchnie, które jednocześnie służą jako powierzchnie podporowe lub oporowe w danym mocowaniu. Zdarza się jednak również, że inne powierzchnie służą do podparcia i oparcia przedmiotu, a inne do ustalenia jego położenia. Wykorzystanie powierzchni podporowych i oporowych, jako baz obróbkowych ma tę przede wszystkim zaletę, że czas potrzebny na ustalenie przedmiotu jest wtedy znacznie krótszy. Nie zawsze jednak bazy obróbkowe mogą spełniać rolę powierzchni podporowych.

Przy obróbce elementów rozróżnić można trzy sposoby ustalenia położenia tj.:

- ustalenie bezpośrednio na obrabiarce ze sprawdzeniem położenia i odpowiednią regulacją,
- ustalenie w przyrządach i uchwytach obróbkowych,
- ustalenie według znaków traserskich.

Z uwagi na pewne uwarunkowania obecnie ustalenie przedmiotu na maszynach CNC ogranicza się do dwóch pierwszych sposobów.

Przyjęcie właściwego sposobu ustalenia uzależnione może być od różnych czynników takich jak wielkość partii produkcyjnej, wymiary gabarytowe półfabrykatu przyjętego do obróbki, żądanej dokładności wykonania, stopnia skomplikowania obrabianych powierzchni, ilości ustawień, możliwości kinematycznych obrabiarki, możliwości układu sterowania. Najczęściej w praktyce przemysłowej spotyka się ustalenie bezpośrednio oraz w przyrządach.

Podstawową funkcją uchwytów obróbkowych, obok ustalania, jest zamocowanie przedmiotu obrabianego.

Zamocowanie zapewnia przedmiotowi podczas obróbki niezmienną pozycję, nadawaną mu za pośrednictwem mechanizmów ustalających i oporowych [2].

Prawidłowe zamocowanie przedmiotu w uchwycie powinno odpowiadać następującym wymaganiom:

- Uzyskane w trakcie zamocowania siły powinny mieć odpowiednią wartość zapewniającą niezmienną pozycję przedmiotu podczas obróbki oraz minimalizowanie niepożądanych drgań powstających w układzie przedmiot obrabiany – uchwyt.
- Przyłożone przez elementy uchwytów siły mocowania nie powinny wywoływać odkształcenia przedmiotu lub uszkodzenia jego powierzchni, jak również nie powinny powodować uszkodzenia elementów oprzyrządowania.
- Punkty przyłożenia sił zamocowania powinny się znajdować w pobliżu obrabianych powierzchni przedmiotu, gdyż wtedy występują mniejsze drgania.

- Zamocowanie powinno cechować się pewnością tzn. nie być podatne na zmniejszenie siły nacisku wywołane niepożądanym oddziaływaniem podczas obróbki, np. na skutek generowanych drgań lub wzrostu temperatury w strefie skrawania.
- Czas zamocowania i odmocowania powinien być możliwie krótki. W przypadku zautomatyzowanej produkcji układy sterujące pracą elementów mocujących powinny mieć możliwość synchronizacji pracy z układami sterowania obrabiarki. Ma to istotne znaczenie w budowie zautomatyzowanych linii produkcyjnych, szczególnie tam, gdzie czynności montażowe wykonywane są za pośrednictwem robotów przemysłowych. Na rys. 12.2 przedstawiono przykłady zautomatyzowanej wymiany przedmiotów obrabianych w przestrzeni obrabiarki i poza nią.
- Rozmieszczenie położenia elementów mocujących powinno być zaprojektowane z uwzględnieniem łatwej obsługi przez pracownika prowadzącego prace ustawcze.

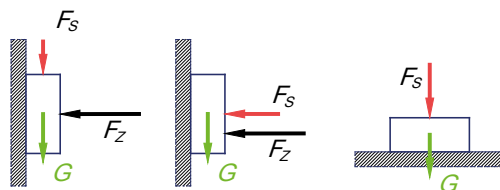


Rys. 12.2. Zrobotyzowana wymiana przedmiotu obrabianego w przestrzeni obróbkowej i poza nią [27]

Zamocowanie elementów maszyn poddanych obróbce wymaga niejednokrotnie przeprowadzenia stosownych obliczeń celem wyznaczenia wartości siły potrzebnej do pewnego zamocowania, która nie będzie powodowała deformacji obrabianego elementu. Problem jest tym większy, że elementy wraz z przebiegiem procesu technologicznego tracą swoją sztywność poprzez usuwanie kolejnych warstw materiału, szczególnie przy obróbce cienkościennych struktur. Dlatego też kwestią kluczową jest dobranie odpowiedniej wartości siły zamocowania przedmiotu i jeśli jest to możliwe regulowanie jej wartości w miarę postępowania procesu obróbki.

Na wartość siły, jaka jest potrzebna do zamocowania przedmiotu obrabianego w uchwycie, wpływają głównie następujące czynniki:

- rodzaj obróbki oraz warunki skrawania i wynikające stąd siły skrawania,
- punkty przyłożenia i kierunki działania sił skrawania i sił zamocowania.
- ciężar przedmiotu, jeśli jest duży.



Rys. 12.3. Różne warianty rozkładu sił w układzie zamocowania przedmiotu obrabianego

Wprowadzając pewne uogólnienie można przyjąć przypadki zamocowania przedmiotów przedstawione na rys.12.3. Największa wartość siły będzie potrzebna w przypadku, gdy siła skrawania działa na tym samym kierunku, co siła ciężkości przedmiotu. Wartość tej siły powinna wynosić:

$$F_z \geq \frac{F_s + G}{\mu}$$

gdzie: F_z – siła zamocowania,

G – ciężar przedmiotu,

F_s – wypadkowa siła skrawania działająca na przedmiot podczas obróbki,

μ – współczynnik tarcia pomiędzy przedmiotem a powierzchnią zamocowania.

Ustalenie minimalnej wartości siły, z jaką należy zamocować przedmiot, aby nie zmienił swojego położenia, jest trudne, a w pewnych przypadkach niemożliwe do wyznaczenia na drodze obliczeń analitycznych. Ma to związek np. ze zmianą wartości wypadkowej siły skrawania uzależnionej od wielu czynników takich jak: wielkość naddatku oraz kąt opasania narzędzia, stan ostrza i jego procentowy udział podczas obróbki czy też warunki chłodzenia i tarcia w strefie skrawania. Wartość siły zamocowania również ulega zmianie na skutek zmiany sztywności obrabianego materiału powodowanej zmianą przekroju poprzecznego obrabianego elementu, odkształceniami sprężystymi przedmiotu jak i elementów uchwytu, miejscowym zgniotem powierzchni obrabianego przedmiotu itd.

Ponadto rzeczywista siła, z jaką zostanie zamocowany przedmiot może istotnie różnić się od wartości zakładanej. Może mieć to związek z różnicami w zakresie siły, jaka jest wywierana na elementy oprzyrządowania, czyli siły operatora mocującego przedmiot obrabiany. Przyjmuje się, że ta wynosi od 150 do 450 N co powoduje, że zastosowane często w oprzyrządowaniu mechanizmy zwiększające lub zmniejszające wpływają na znaczny rozrzut siły zamocowania.

W praktyce przemysłowej przyjmuje się często wartość siły zamocowania na dużo większym poziomie, kontrolując jednocześnie odkształcenia sprężyste, jakie wywoływane są w przedmiocie obrabianym. W przypadku przekroczenia dopuszczalnych wartości sił zamocowania, szczególnie przy konstrukcjach cienkościennych, może dojść do wystąpienia przekroczenia tolerancji wymiarowo-kształtowej poprzez deformacje obrabianego elementu.

Rozwiązaniem w tym zakresie może być przyjęcie specjalnych rozwiązań w budowie oprzyrządowania specjalnego lub wykorzystanie oprzyrządowania normalnego wyposażonych w funkcję kontroli sił zamocowania. Przykładem na to mogą być imadła firmy Schunk (rys.12.4) pozwalające na regulację siły zamocowania w zakresie 4 – 40 kN.



Rys. 12.4. Precyzyjne imadło maszynowe Schunk KONTEC KSG z regulowaną siłą mocowania: a) budowa imadła; b) mechanizm regulacji siły zamocowania [21]

Innymi rozwiązaniami w tym zakresie może być zastosowanie oprzyrządowania o napędzie pneumatycznym, podciśnieniowym oraz hydraulicznym, które ze względu na swoją budowę pozwalają na sterowanie i kontrolowanie siły mocowania. Urządzenia te szerzej zostaną omówione w dalszej części rozdziału.

Podobnie jak dobór odpowiedniej siły zamocowania, ważnym aspektem przy dokonaniu prawidłowego zamocowania przedmiotu jest wybór miejsca działania sił mocujących jak i ich kierunku.

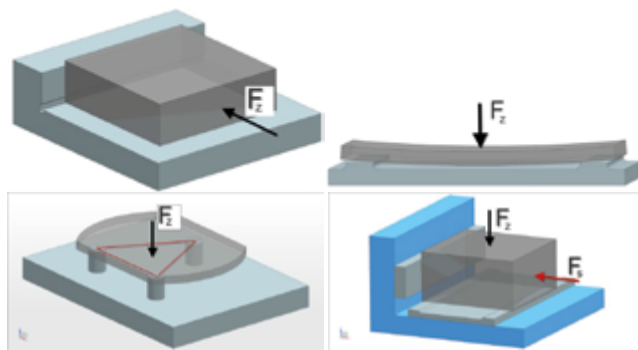
Rozmieszczenie oraz liczba punktów mocowania, na których działają odpowiednio ukierunkowane siły mocujące zależy od:

- wartości i kierunków sił skrawania oddziałujących na przedmiot,
- kształtu mocowanej konstrukcji oraz stopnia jej sztywności,
- liczby i położenia elementów ustalających, podporowych i oporowych uchwytu,
- położenia powierzchni ustalających i oporowych względem powierzchni obrabianych,
- wymaganej dokładności obróbki i wymaganych parametrów jakościowych powierzchni obrabianej.

Jeśli podczas obróbki siły skrawania są niewielkie, a przedmiot nieduży i o prostych kształtach, wystarcza zwykle zamocowanie w jednym miejscu. Przy większych siłach skrawania i dużych gabarytach przedmiotu o złożonej budowie konieczna jest większa liczba punktów zamocowania i to tym większa, im mniejsza jest sztywność przedmiotu [1, 2].

Miejsca, w których dokonywać należy zamocowania powinny znajdować się, jeżeli to jest możliwe, na powierzchniach leżących prostopadle do stałych elemen-

tów ustalających lub oporowych uchwytu. Na rys.12.5 przedstawiono różne przypadki rozmieszczenia elementów mocujących względem przedmiotu obrabianego. W zamocowaniu przedmiotów stanowiących cienkościenne struktury o małej sztywności należy unikać przypadków, w których dojść może do zamocowania w miejscach niepodpartych. Należy przy tym pamiętać, że miejsca zamocowania muszą znajdować się wewnątrz figury utworzonej przez elementy ustalające uchwytu. Jeżeli przedmiot ma być zamocowany w jednym miejscu, to pożądane jest, aby to miejsce znajdowało się w pobliżu środka figury utworzonej przez elementy ustalające, gdyż wtedy siła zamocowująca rozkłada się równomiernie na wszystkie elementy ustalające.



Rys. 12.5. Rozmieszczenie elementów mocujących względem przedmiotu obrabianego

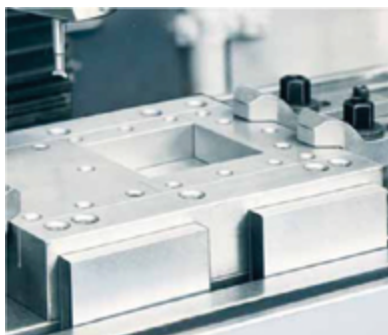
Istotne znaczenie ma również kierunek, na jakim działa siła zamocowania. Przy jego obieraniu należy dążyć do zapewnienia prostokątności powierzchni styku przedmiotu z elementami ustalającymi lub oporowymi, przez co zmniejsza się ryzyko unoszenia lub odsuwania przedmiotu obrabianego, jednocześnie pozwala na zmniejszenie siły zamocowania. Poza tym kierunek siły zamocowania powinien być zgodny z kierunkiem siły skrawania lub być do niego prostokątnym w przypadku, gdy siła skrawania działa na stały element ustalający lub oporowy.

Ustalenie położenia bezpośrednio na obrabiarce CNC

Za przyjęciem ustalenia bezpośrednio na stole obrabiarki w przypadku produkcji jednostkowej lub małoseryjnej przemawia wielkość partii produkcyjnej a także dodatkowe wyposażenie pomiarowe obrabiarki w sondy dotykowe oraz stopień zaawansowania sterowania numerycznego sterującego pracą obrabiarki posiadający specjalne cykle ustawcze.

Przyjęcie tego rodzaju rozwiązania może wydawać się również trafne ze względu na to, że większość powierzchni części jest kształtowanych podczas obróbki, a ewentualne błędy wynikające z ustalenia półfabrykatu powinny zawierać się

w założonych naddatkach na obróbkę zgrubną. Powierzchnie stołów nowoczesnych obrabiarek CNC wraz z wykonanymi w nich rowkami teowymi wykonane są z zachowaniem wysokich tolerancji wymiarowych i stanowią często powierzchnie ustalające. Przykład tego typu ustalenia za pomocą pary płytek równoległościennych przedstawiono na rys.12.6.



Rys. 12.6. Ustalenie przedmiotu obrabianego na stole obrabiarki za pomocą płytek [15]

Ustalenie przedmiotu bezpośrednio na stole obróbkowym wiąże się z koniecznością wykonania dodatkowych czynności w celu uzyskania właściwego położenia przedmiotu obrabianego. Czynności te powodują pokrycie się odpowiednich powierzchni przygotówki w stosunku do kierunków osi napędowych znajdujących się w płaszczyźnie stołu. Właściwe wykonanie tych czynności jest niejednokrotnie bardzo czasochłonne, jednakże niezbędne, ponieważ każde odchylenie może mieć wpływ bezpośrednio na dokładność obróbki oraz możliwość obróbki, zwłaszcza w przypadku elementów wielkogabarytowych.

W przypadku obróbki na obrabiarkach CNC wyposażonych w czujniki dotykowe, zwane również dotykowymi sondami palcowymi lub testerami, możliwe jest przeprowadzenie kontroli ustalenia przedmiotu poprzez wykonanie stosownego pomiaru. W tym celu we wrzecionie obrabiarki umieszcza się, za pośrednictwem zwykłej oprawki narzędziowej, uniwersalny czujnik 3D lub też za pomocą stożka wykonanego w zabudowie sondy (rys. 12.7).



Rys. 12.7. Przykład czujników dotykowych zegarowego i cyfrowego Haimer [25]

Takie czujniki stanowią bardzo precyzyjne i wszechstronne przyrządy pomiarowe, które mogą być zastosowane zarówno do wykonywania pomiarów na frezarkach, tokarkach jak i maszynach erozyjnych dzięki izolowanej końcówce czujnika.

W zależności od konstrukcji zegarowe czujniki 3D umożliwiają pomiar przedmiotu z dokładnością na poziomie 0,01 mm lub w przypadku elektronicznych czujników 3D jest to nawet 0,001 mm. Prowadzenie pomiarów z użyciem czujników 3D eliminuje konieczność wykonywania próbnich obróbek, eliminuje również konieczność wykonywania obliczeń. Przyczynia się to do redukcji kosztów oraz zwiększenia wydajności produkcji.

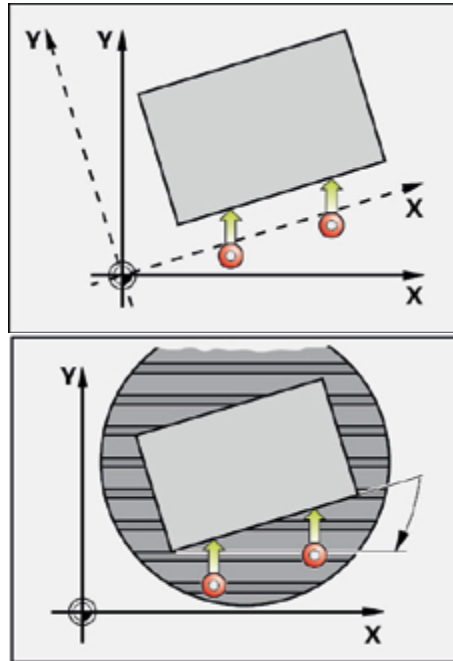
W przypadku produkcji niewielkich lub średnich serii, jak również w przypadku obróbki dużych struktur, na przykład lotniczych, czasy ustawienia są znaczącym czynnikiem decydującym o efektywności procesu. Właściwym rozwiązaniem pomagającym skracać a wręcz eliminować niepotrzebne dodatkowe czynności w tym zakresie jest korzystanie ze specjalnych narzędzi i funkcji układów sterowania takich jak:

- Impulsowe sondy 3D (rys.12.8) – poprzez zastosowanie sondy pomiarowej 3D uzyskuje się znaczącą redukcję czasu ustalenia przedmiotu obrabianego w przestrzeni obrabiarki. Uzyskuje się również możliwość automatycznej kontroli i pomiaru przedmiotu z wykorzystaniem gotowych cykli a także prowadzenia zaprogramowanych torów pomiarowych.
- Specjalne cykle układów sterowania np.: Kompensowania ukośnego położenia realizowane poprzez układ TNC 620 w sterowaniu Heidenhain.

W zależności od możliwości kinematycznych obrabiarki otrzymane wyniki układ sterowania może skompensować na dwa sposoby zaprezentowane na rys.12.9.

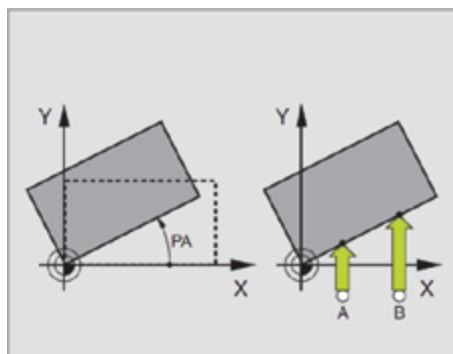


Rys. 12.8. Sondy impulsowe Heidenhain [28]



Rys. 12.9. Sposoby kompensacji ukośnego ustalenia przedmiotów w przestrzeni obróbkowej na obrabiarkach: a) w układzie konwencjonalnym; b) z osią obrotową [28]

Pierwszy sposób kompensacji polega na zmierzeniu ukośnego położenia przedmiotu a następnie rachunkowym przeliczeniu nowych współrzędnych zdefiniowanych pierwotnie w programie obróbki. Układ TNC 620 kompensuje ukośne położenie poprzez tak zwany „obrót od podstawy”, tzn. że program obróbki zostaje wykonany z obrotem pod określonym kątem PA wskazanym na rys.12.10. W tym celu sterowanie ustawia kąt obrotu na kąt, który ma utworzyć powierzchnia przedmiotu z osią odniesienia kąta płaszczyzny obróbki.



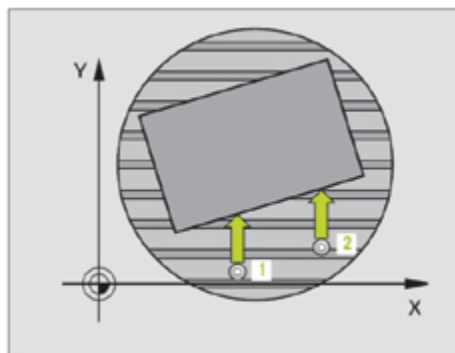
Rys. 12.10. Istota kompensacji ustalenia przedmiotu poprzez przeliczenie kąt obrotu [28]

Ważnym jest, aby kierunek próbkowania dla wyznaczenia ukośnego położenia przedmiotu wybierać zawsze prostopadłe do osi układu odniesienia kąta, co zaprezentowano strzałkami na rys. 12.10. Z praktyki przyjmuje się również wyznaczenie pomiaru drugiego punktu, jako tego bardziej oddalonego od początku wyznaczonego miejsca zerowego przedmiotu w stosunku do pierwszego pomiaru (punkty A i B na rys. 12.10).

Operator może w dowolnej chwili wyświetlić na ekranie sterowania wartość kąta obrotu podstawowego.

W przypadku kompleksowych zadań przy automatyzowanej obróbce elementów możliwe jest pominięcie czynności wykonywanych przez operatora poprzez wykorzystanie programowalnych cykli próbkowania pozwalających na automatyczny pomiar ustalenia półfabrykatów.

Sposobem na to jest kompensacja obrotu podstawowego (rys. 12.11) poprzez ós obrótu. Układ sterowania TNC kompensuje pomierzone błędne ustalenie poprzez obrót osi A,B lub C. Dzięki temu rozwiązaniu zamocowanie przedmiotu może mieć miejsce dowolnie w przestrzeni stołu przy zachowaniu jednak odpowiednich wytycznych technologa-programisty określających minimalny obszar uwzględniający drogę wejścia – wyjścia narzędzia.



Rys. 12.11. Istota kompensacji ustalenia przedmiotu poprzez obrót stołu [28]

Przedstawione metody kontroli ustalenia przedmiotu na obrabiarkach CNC znacznie ułatwiają pracę operatorów maszyn. Różnice w powtarzalności wykonywanych pomiarów ustalenia z wykorzystaniem poszczególnych narzędzi są znaczne [5,7,8]. Stąd też decyzja o przyjętym systemie pomiarowym, w jaki wyposażona będzie obrabiarka, podjęta powinna być już na etapie jej zakupu gdyż nie zawsze możliwa jest jej późniejsza modernizacja zapewniająca żadaną funkcjonalność pod względem pomiarowym. Stąd też ważnym aspektem jest kształtowanie odpowiedniej świadomości w kadrze inżynierów technologów odpowiedzialnych za zakupy środków produkcji.

Ustalenie w przyrządach i uchwytach obróbkowych

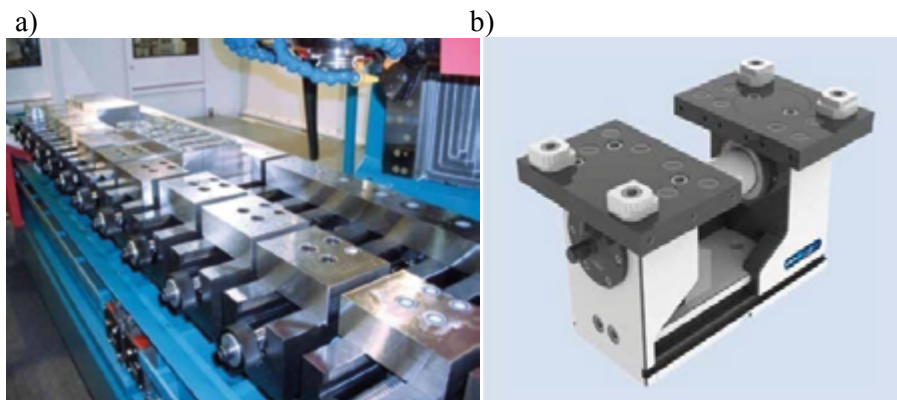
Ustalanie położenia części obrabianej za pomocą uchwytów obróbkowych, polega na połączeniu obrabianego elementu z dodatkową konstrukcją oprzyrządowania poprzez zespół elementów ustalających i mocujących, a w pewnych przypadkach z użyciem również elementów prowadzących narzędzie. Całość konstrukcji przyrządu zmontowana jest we wspólnym dla wszystkich jego elementów korpusie. Budowa oprzyrządowania jest jednak kosztowna i z tego względu ma zastosowanie jedynie przy uwzględnieniu szczególnych cech produkcji, jakimi mogą być produkcja seryjna lub obróbka elementów o skomplikowanych geometrycznie kształtach, co ma często miejsce w produkcji lotniczej.



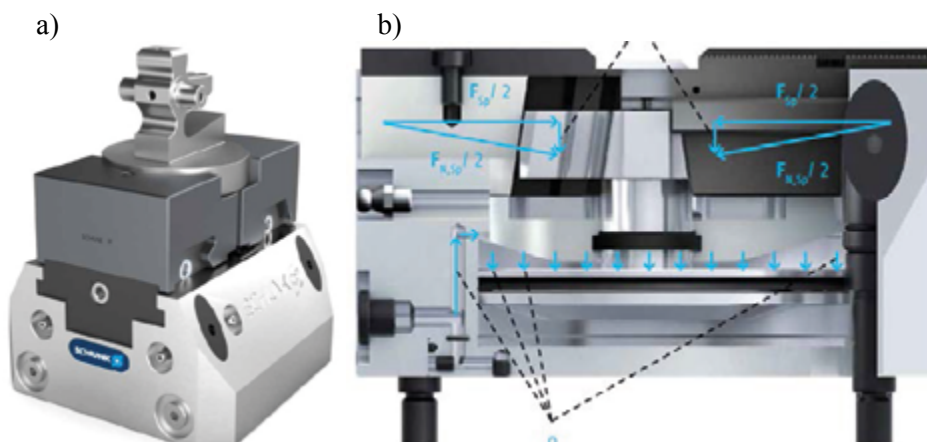
Rys. 12.12. Przykłady oprzyrządowania specjalnego do obróbki struktur cienkościennych [14]

Uchwyty obróbkowe stosowane są szczególnie w przypadku wytwarzania elementów stanowiących cienkie struktury samonośnych paneli poszycia statków powietrznych. Z uwagi na specyficzne kształty i wymiary takich konstrukcji często wykonywane oprzyrządowanie stanowi unikalne rozwiązanie i nie może być zaadoptowane do innych przypadków obróbki. Na rys.12.12 zaprezentowano oprzyrządowanie specjalne do zamocowania elementów stanowiących fragmenty poszycia poddanych obróbce.

Do ustalenia przedmiotów obrabianych w jednej operacji należy stosować **uchwyty normalne**. W przypadku obrabiarek z grupy tokarek oznacza to zastosowanie wszelkiego rodzaju uchwytów samocentrujących (uchwyty szczękowe i tulejki zaciskowe). W przypadku frezarek, wiertarek i strugarek poprzecznych oznacza to stosowanie przede wszystkim zaprezentowanych na rys. 12.13 **imadeł maszynowych**. Jeżeli uchwytów samocentrujących lub imadeł maszynowych nie można zastosować tylko z uwagi na kształt ich szczęk, to zamiast budować uchwyty specjalne, korzystniej jest wykorzystać zmodyfikowane szczęki, których kształt odpowiadać będzie powierzchni stykającej się z przedmiotem obrabianym. Rozwiązanie to może być zastosowane zarówno w przypadku imadeł jak i uchwytów samocentrujących. Przykład takiego rozwiązania pokazano na rys.12.13b.



Rys. 12.13. Zamocowanie przedmiotu obrabianego: a) na zespole imadeł maszynowych; b) imadło maszynowe KONTEC KSX ze zmodyfikowanymi szczękami firmy SCHUNK [12]



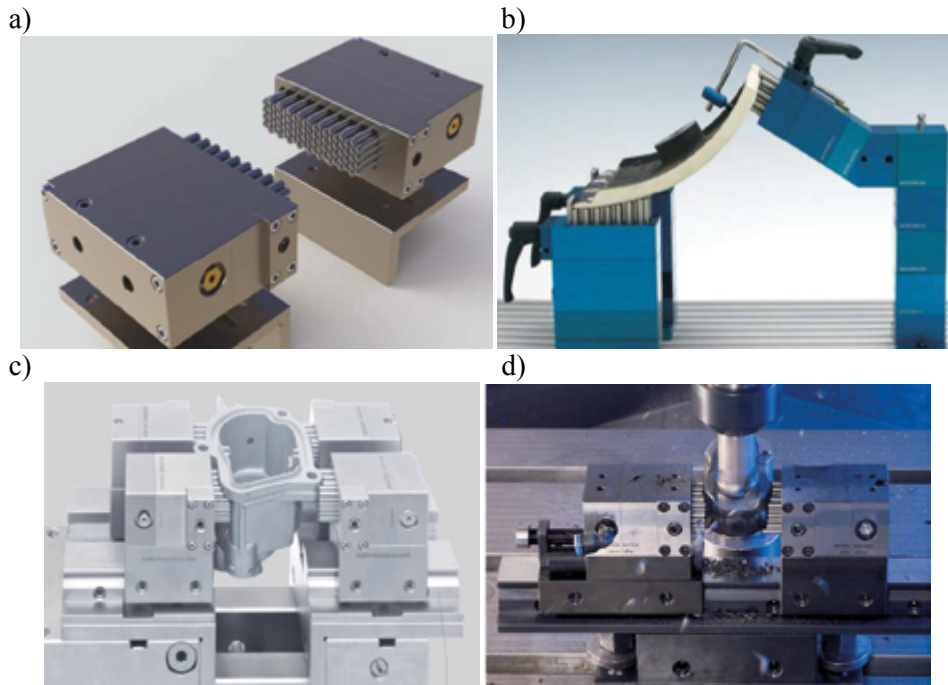
Rys. 12.14. Bloki mocujące TANDEM firmy Schunk: a) z zamocowanym elementem; b) zasada działania modułu z zasilaniem pneumatycznym [21]

Zwiększenie efektywności obróbki często może być zrealizowane poprzez wprowadzenie zautomatyzowanego systemu pozwalającego na szybsze zamocowanie elementów obrabianych w przestrzeni obrabiarki. Pomocne w tym względzie mogą być blokowe moduły mocujące, których przykładem jest oprzyrządowanie TANDEM firmy Schunk. Bloki wyposażono w układ przesuwnych prowadników szczęk napędzanych w zależności od przyjętego rozwiązania poprzez sprężone powietrze, hydraulicznie, przekładnią mechaniczną lub układem sprężyn (rys.12.14).

Zwarta i sztywna konstrukcja oprzyrządowania zapewnia uzyskanie regulowanej wartości siły zamocowania zawierającej się w zakresie (4-55) kN, której wartość może być kontrolowana i monitorowana przez układ sterowania. Dla zapewnienia

uniwersalności tego rodzaju oprzyrządowania dostępna jest szeroka gama różnego rodzaju wkładek, których wymiary, konstrukcja powierzchni nośnych może być dostosowana do indywidualnych potrzeb. Dodatkowo możliwe jest zautomatyzowanie pracy tego rodzaju oprzyrządowania i maksymalne skrócenie czasów potrzebnych na zmiany zamocowania elementów obrabianych.

Innego rodzaju innowacyjnym przykładem oprzyrządowania może być system uchwytów MATRIX. Opiera się on o układ równoległe pracujących niezależnych wałeczków zakończonych kulistymi powierzchniami, wysuwanych siłą powodowaną naciskiem sprężyn. Po ułożeniu przedmiotu obrabianego na zespole wałeczków ich położenie jest ustalone i zablokowane specjalnym mechanizmem. Dzięki temu uzyskuje się powierzchnię podparcia rozłożoną na punktowo rozmieszczonej dużej liczbie podpór (rys.12.15).



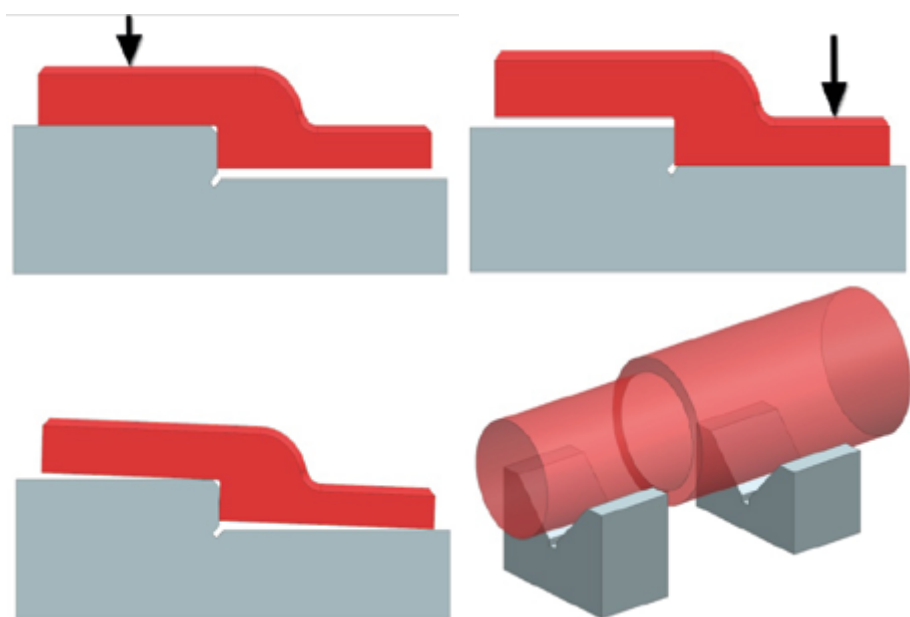
Rys. 12.15. System mocowania MATRIX: a) Zestaw modułowy do zabudowy na imadle maszynowym; b) Pokrywa ustalona w dwóch uchwytach; c) zamocowany w MATRIX korpus ze stopu aluminium; d) przykład obróbki elementu zamocowanego w MATRIX [20]

System ten może stanowić zarówno formę podpór jak również układu dwustronnego działania elementów mocujących. Dostępne są różnej wielkości moduły dające się składać w celu mocowania elementów o większych wymiarach. System Matrix może być zamocowany bezpośrednio na stole obrabiarki, jak również

spełniać funkcję szczęki i stanowić element składowy imadła maszynowego. Dzięki zastosowaniu tego systemu możliwe jest uniknięcie stosowania baz i ich wcześniejszego przygotowania w celu zamocowania przedmiotu.

12.2. Zasady prawidłowego ustalenia przedmiotów

Ustalenie przedmiotu obrabianego często może być wykonane w sposób błędny. Najczęściej dochodzi do tego, gdy ten sam stopień swobody odbierany jest jednocześnie przez dwa lub więcej elementów ustalających. Dochodzi wtedy, do przesztynnienia nazywanego **przestaleniem** przedmiotu. W przypadku tego rodzaju błędu przedmiot obrabiany nie jest jednoznacznie ustalony, przez co może zajmować w uchwycie różne położenia. Konstruując uchwyt należy więc pamiętać, aby nie wprowadzać zbędnych, dodatkowych powierzchni ustalających, co nie tylko nie poprawia jego dokładności, ale może uniemożliwić całkowicie jego ustalenie. Przykłady błędnego ustalenia pokazano na rys.12.16.

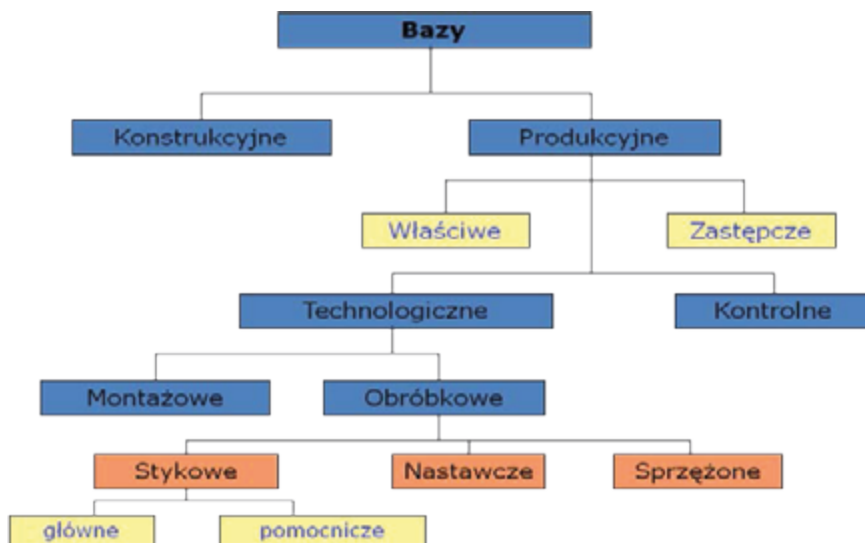


Rys. 12.16. Przykłady położenia przedmiotu przy jego przestaleniu

Analizując błędy, do jakich dochodzi podczas obróbki można stwierdzić, że większość z nich powodowana jest błędnie przyjętymi bazami. **Baza** jest powierzchnią, linią, lub punktem, względem których ustala się w sposób bezpośredni położenie innej rozpatrywanej powierzchni, linii lub punktu tego przedmiotu

lub innych (jeśli jest to baza montażowa). Na tej podstawie **bazowaniem** nazywać będziemy nadanie przedmiotowi określonego położenia wymaganego dla wykonania operacji technologicznej.

Podział baz zgodnie z PN-83/M-01250 przedstawiono na rys.12.17.



Rys. 12.17. Klasyfikacja i podział baz wg PN-83/M-01250

Baza konstrukcyjna jest to baza przyjęta podczas konstruowania wyrobu w celu określenia położenia w przedmiocie, wchodzącym w skład tego wyrobu, jakiegoś punktu, linii lub powierzchni w sposób uwarunkowany prawidłowością współpracy tego przedmiotu z innymi przedmiotami w wyrobie. Od tej bazy z reguły odnosi się wymiary na rysunkach konstrukcyjnych. Bardzo często są to bazy wirtualne, stanowiące np. odległości osi otworów.

Baza produkcyjna jest to baza przyjęta w procesie produkcyjnym przedmiotu w celu określenia położenia w przedmiocie jakiegoś punktu, linii lub powierzchni w sposób uwarunkowany sposobem wytwarzania przedmiotu i całego wyrobu, w skład którego wchodzi przedmiot.

Bazy produkcyjne ze względu na ich znaczenie można podzielić na *właściwe* i *zastępcze* oraz ze względu na przeznaczenie — na *technologiczne* i *kontrolne*.

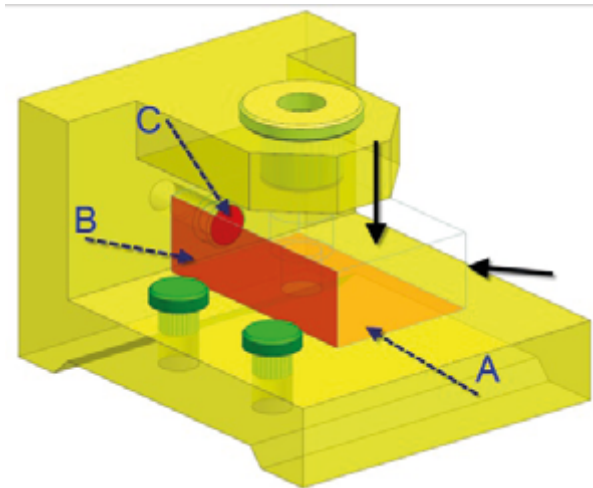
Baza właściwa jest to baza produkcyjna zgodna z bazą konstrukcyjną.

Baza zastępcza jest to baza produkcyjna różna od bazy konstrukcyjnej.

Baza technologiczna jest to baza produkcyjna przyjęta przy realizowaniu procesu technologicznego jakiejś części wyrobu, w celu określenia położenia w tej części jakiegoś punktu, linii lub powierzchni.

Baza kontrolna jest to baza produkcyjna przyjęta przy kontroli wykonania jakiejś części, w celu określenia położenia w tej części jakiegoś punktu, linii lub powierzchni.

Baza obróbkowa – baza technologiczna przyjęta w procesie obróbki przedmiotu w celu określenia w tym przedmiocie położenia obrabianej powierzchni lub określenia położenia jakiegoś punktu lub linii przy wykonywaniu powierzchni, która sama lub wspólnie z innymi powierzchniami tego przedmiotu wyznacza ten punkt albo linię.



Rys. 12.18. Przykład baz stykowych

Baza stykowa – baza obróbkowa, która styka się z odpowiednimi elementami obrabiarki, uchwytu lub narzędzia. Na rys. 12.18 zaprezentowano przykład baz stykowych przy wykonaniu otworu w płycie ustawionej na przyrządzie. Poprzez ich zastosowanie przedmiot obrabiany opiera się bezpośrednio o powierzchnię przyrządu (baza A), do której jest dociskany siłą zamocowania działającą na kierunku prostopadłym do niej. Z kolei powierzchnie kołków oporowych tworzą dwie kolejne bazowe powierzchnie stykowe (B i C) przez dociśnięcie ich siłą zamocowania w płaszczyźnie poziomej przedmiotu.

Baza stykowa główna – baza stykowa, która przy ustalaniu kolejnych przedmiotów *nie zmienia* swego położenia w kierunku ważnym dla wyniku obróbki.

Baza stykowa pomocnicza – baza stykowa, która przy ustalaniu kolejnych przedmiotów *zmienia* swoje położenie w kierunku ważnym dla wyniku obróbki.

Baza sprzężona – baza obróbkowa, gdy przy tym samym położeniu przedmiotu obrabianego względem odpowiednich elementów obrabiarki lub uchwytu wykonuje się zarówno tę bazę, jak i rozpatrywaną powierzchnię tak, żeby ich wzajemne położenie zależne było jedynie od położenia wykonujących je narzędzi.

Baza obróbkowa nastawcza – baza, której położenie nastawia się (ustawia się) względem odpowiednich elementów obrabiarki, uchwytu lub narzędzia, aby uzyskać prawidłowe położenie przedmiotu do obróbki.

12.3. Zasady wyboru baz i zasady jedności baz

Dokonanie odpowiedniego wyboru bazy obróbkowej szczególnie w przypadkach obróbki elementów lotniczych jest kwestią kluczową. W wielu przypadkach całkowita obróbka przedmiotu lub znaczna jej część wykonywana jest w pierwszym zamocowaniu według bazy wstępnej. W przypadku przedmiotów obrabianych całkowicie należy przyjmować za podstawy obróbkowe przede wszystkim te powierzchnie, które mają najmniejsze naddatki. Ma to szczególne znaczenie w obróbce elementów wielkogabarytowych.

Ważnym jest, aby przyjmowane, jako bazy w pierwszych operacjach powierzchni surowe były nimi tylko we wstępnych operacjach, które mają na celu wykonanie baz do dalszych operacji. Korzystnie jest dobierać takie bazy wstępne, których powierzchnie są możliwie duże, równe i czyste. Po zmianie zamocowania w dalszej obróbce należy ustalać przedmiot obrabiany w oparciu o powierzchnie obrobione.

Podczas wykonywania obróbki dokładnej należy, jeżeli to możliwe, bazować na powierzchniach stanowiących bazy konstrukcyjne, a więc bazy obróbkowe właściwe.

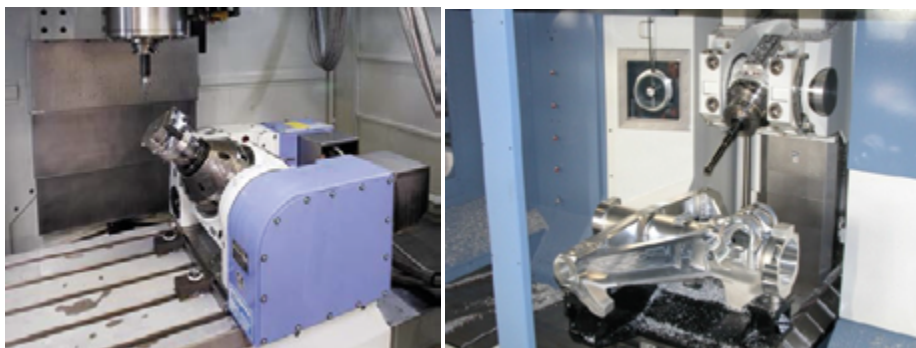
Podczas obróbki dokładnej należy za powierzchnie bazowe przyjmować te powierzchnie, od których są stawiane wymiary tolerowane, określające położenie powierzchni obrabianej. W tym przypadku błąd wynikający ze sposobu ustalenia przedmiotu będzie równy zeru. Jeżeli kształt przedmiotu obrabianego lub inne przyczyny nie pozwalają na taki wybór, to za podstawę obróbkową może być przyjęta inna powierzchnia, jednak taka, aby otrzymany przy tym błąd ustalenia był znacznie mniejszy od wartości tolerancji wymiaru obróbkowego w danej operacji.

Dobór powierzchni bazowych powinien zapewniać jak najmniejsze odkształcenie części obrabianej wskutek działania zacisków i sił skrawania. Zwiększenie sztywności układu uzyskuje się przez zmniejszenie odległości pomiędzy elementami mocującymi. Duży wpływ na sztywność ustalenia ma również sposób zamocowania przedmiotu w przyrządzie, a tym samym możliwość występowania momentów gnących od działających na układ sił skrawania i zamocowania.

W wyborze baz obróbkowych należy kierować się również konstrukcją uchwytów obróbkowych, aby ich konstrukcja była możliwie prosta i modularna, co zasadniczo ma wpływ na koszty przygotowania produkcji. Należy w tym względzie wykorzystywać dostępne na rynku rozwiązania eliminując konieczność wykonywania elementów specjalnych. Konstrukcja przyrządu powinna zapewniać pracownikowi również łatwość ustawiania przedmiotu i jego mocowania.

Przy wyborze baz obróbkowych należy kierować się zasadą niezmienności baz podczas obróbki, polegającą na tym, że wszystkie operacje obróbki dokładnych powierzchni są wykonywane przy ustalaniu przedmiotu wg jednych, zawsze tych samych baz obróbkowych. Zmiana baz powoduje konieczność zmiany granicznych odchyłek wymiarów pośrednich, co przy obróbce dokładnej może spowodować znaczące zawężenie tolerancji wymiarów pośrednich.

Rozwój obrabiarek CNC poprzez ich kinematyczne rozwiązania dał możliwość prowadzenia obróbki wielostronnej bez konieczności dokonywania zmiany baz. Dzięki zastosowaniu stołów uchylno-obrotowych oraz skrętnych układów wrzecion zaprezentowanych na rys.12.19 możliwe jest prowadzenie narzędzia po trajektoriach wyznaczonych w przestrzeni obrabiarki zmianą pięciu współrzędnych (3 translacje i 2 rotacje). Stało się to możliwe przede wszystkim dzięki rozwojowi układów sterowania oraz oprogramowaniu wspomagającemu wytwarzanie CAD/CAM. [6].



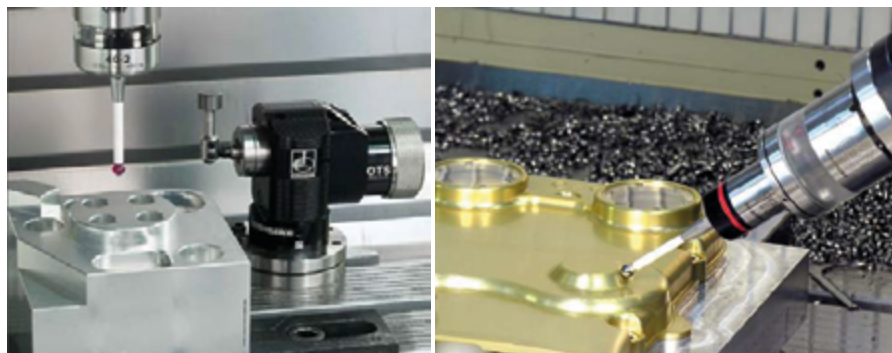
Rys. 12.19. *Obróbka części na dodatkowym stole uchylno-obrotowym na maszynie Hurko oraz obróbka elementu goleni samolotu przy pomocy skrętnego wrzeciona obrabiarki MCM ACTION 2600 MP6 [24,26]*

Symultaniczna obróbka pięcioosiowa wymaga zaawansowanego i drogiego układu sterowania, dlatego też w przypadku, gdy ze względu na tolerancję chcemy zmniejszyć ilość zmian baz obróbkowych i dodatkowych „przemocowań” a jednocześnie nie dysponujemy dostatecznymi środkami finansowymi, możliwe jest zastosowanie obróbki pięciostronnej. Różni się ona od pełnej pięcioosiowej obróbki przestawnym działaniem mechanizmu uchylno-obrotowego stołu obrabiarki tylko pomiędzy kolejnymi zabiegami bez możliwości ich zsynchronizowania z trajektorią narzędzia. Uzyskujemy dzięki temu w wielu przypadkach zapewnienie wysokiej funkcjonalności obróbki i wysokich dokładności w zakresie wytwarzanych części. Przykładem na to może być konstrukcja firmy DMG DMU50ecoline (rys.12.20) oraz centrum obróbkowe Multi-tec8 zapewniającej jednocześnie możliwość pięciostronnej obróbki szlifowaniem.



Rys. 12.20. Pięciosłone centrum obróbkowe DMG DMU 50ecoline wraz z przykładem części obrabianej w jednym zamocowaniu [22]

Podczas wytwarzania elementów o złożonej geometrii istotna jest kontrola wymiarów pomiędzy kolejnymi operacjami, a nawet międzyzabiegowa. Dlatego też coraz częściej wykorzystuje się przedmiotowe sondy pomiarowe do identyfikacji przedmiotu w przestrzeni roboczej obrabiarki, identyfikacji naddatków obróbkowych, a nawet do prowadzenia procesów kontroli wymiarowej (rys.12.21). Skracza to proces przygotowania i prowadzenia procesu technologicznego, a jednocześnie pozwala na redukcję braków oraz obniża koszty związane z procesem pomiaru poza obrabiarką a tym samym koszt całego procesu wytwarzania.



Rys. 12.21. Pomiar przedmiotu obrabianego sondami Renishaw i Marposs [23,31]

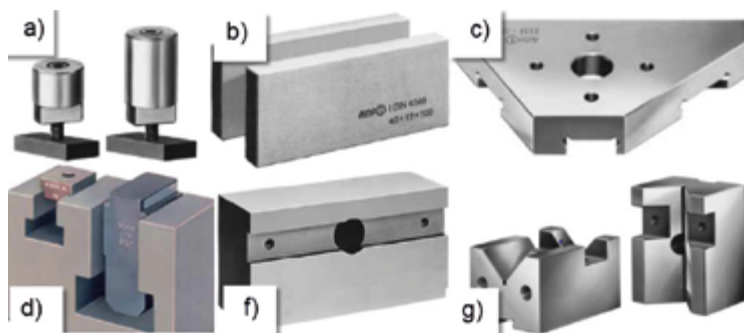
Zastosowanie takiego rozwiązania wpływa przede wszystkim na możliwość prowadzenia operacji pomiarowych bezpośrednio po operacjach technologicznych w jednym zamocowaniu bez konieczności odmocowania przedmiotu celem

wykonania pomiaru np. na maszynie CMM. Eliminacja błędów, do jakich może dojść po ponownym zamocowaniu przedmiotu pozwala na zwiększenie efektywności produkcji przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej dokładności obróbki. Dodatkowo możliwe jest prowadzenie stałego monitorowania wytwarzanych elementów i odpowiednie reagowanie w przypadku wykrycia nieprawidłowości powodowanych np. zużyciem ostrza narzędzia. Opracowany automatycznie program pomiarowy pozwala określić wartość odchyłki wymiaru zmierzonego i w razie potrzeby skorygować go ponowną obróbką tak, aby mieścił się on w założonej tolerancji.

12.4. Ważniejsze elementy ustalające i mocujące stosowane przy obróbce CNC

Dobierając potrzebne elementy oprzyrządowania należy przede wszystkim przeanalizować, na podstawie wcześniej przedstawionych zasad, jaka minimalna ilość elementów jest potrzebna, aby w sposób pewny ustalić i zamocować przedmiot i jakiego typu będą to elementy.

Podstawowymi elementami ustalającymi położenie przedmiotu obrabianego są wszelkiej konstrukcji kołki, sworznie, płytki równoległościenne, pryzmy, zderzaki oraz elementy oporowe. Ich wymiary zależą od konkretnego rozwiązania i mogą być swobodnie dostosowane do konkretnej aplikacji. Wybrane przykłady elementów ustalających pokazano na rys.12.22.

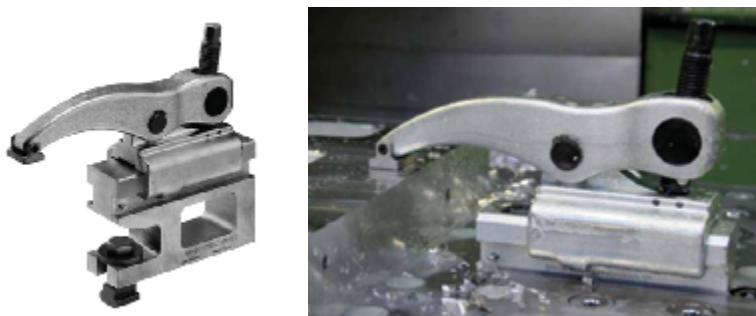


Rys. 12.22. Przykładowe elementy ustalające: a) sworznie ustalające; b) para płytek równoległościennych; c) zderzak kątowy; d) kamienie ustalające swobodne; f) zderzak równoległościenny; g) pryzmy [15]

Podstawowymi elementami służącymi do wywierania dużych i pewnych sił nacisku na mocowany element są wszelkiego rodzaju dociski. Dociski powodują przeniesienie przyłożonej do jednego ich końca siły, jej zwiększenie na zasadzie

np. dźwigni oraz niezmiennie utrzymanie podczas całego procesu obróbki. Zasada ich działania może być różna i zależy od konstrukcji docisku. Najczęściej spotykanymi dociskami są dociski śrubowe, dźwigniowe, sprężynowe, krzywkowe oraz mimośrodowe. Mechanizmy mocujące można również podzielić ze względu na rodzaj źródła siły na: ręczne, pneumatyczne, hydrauliczne oraz elektryczne.

Jednymi z najczęściej stosowanymi docisków są dociski śrubowe. Przykłady takich docisków pokazano na rys.12.23. Siła przyłożona do ramienia mocującego poprzez śrubę umieszczoną na jednym z końców dźwigni jest zwiększana poprzez wahliwy element dociskowy i przenoszona na element obrabiany.



Rys. 12.23. Docisk śrubowy: przesuwny z elementem pośrednim; zamocowanie przedmiotu podczas obróbki [15]

Elementy te poprzez kucie wykonane są z ulepszonej stali stopowej i dzięki specjalnej konstrukcji możliwe jest uzyskiwanie zmiennych wysokości mocowania wraz z przesuwem na elemencie podstawowym, co zapewnia szybkie i nieskomplikowane zamocowanie siłą na poziomie 16-25 kN. Elementy te posiadają jednak spore ograniczenia ze względu na maksymalną wysokość przedmiotów, jakie mogą być zamocowane za ich pośrednictwem, co jest związane z wysokością elementów podstawowych lub wsporników.

W takich aplikacjach gdzie wymagane jest zastosowanie dużych sił zamocowania i jednocześnie elastyczne dostosowanie się do różnych wysokości mocowanych przedmiotów najczęściej stosowane są łapy dociskowe. Ich zaletą jest uniwersalność przede wszystkim przy mocowaniu pojedynczych części oraz mniejszych bądź średnich seriach o zmieniających się wysokościach, na jakich znajduje się powierzchnia mocująca. Można dokonywać ich ustawienia w stosunku do przedmiotu obrabianego pod dowolnym kątem, pionowo jak i w poziomie. Elementy te cechuje prosta konstrukcja a przez to niewielki koszt jednostkowy. Dzięki kompaktowej budowie mogą one w bezpieczny sposób przenosić duże siły, co jest istotne szczególnie w przypadku dużych wysokości, na jakich dokonywane jest zamocowanie. Przykłady różnej konstrukcji łap pokazano na rys.12.24. Powszechnie stosowanym typem łap dociskowych są łapy zwykłe oraz schodkowe.



Rys. 12.24. Różne przykłady łap dociskowych [15]

Aby możliwe było zamocowanie obrabianego za pomocą łapy dociskowej przedmiotu o dużej wysokości potrzebne jest zastosowanie elementów, na których łapa z jednej strony będzie mogła się wesprzeć. Może odbywać się to poprzez śruby podporowe wkręcane bezpośrednio w otwór łapy jak również za pomocą specjalnych podpór. Ciekawym rozwiązaniem konstrukcyjnym w tym zakresie jest podpórka schodkowa-śrubowa pokazana na rys.12.25.



Rys. 12.25. Łapa dociskowa ze śrubową podpórką schodkową oraz jej zastosowanie [15]

Składa się ona z łapy dociskowej (1) i dwóch specjalnych elementów (2, 3) ze wzajemnie współpracującymi spiralnie naciętymi występami. Pomiedzy współpracującymi elementami złączonymi śrubą (4) znajduje się na tulei (5) sprężyna (6) utrzymująca elementy w zadanym położeniu. Dzięki tej konstrukcji w sposób szybki może być ona dostosowana do żądanej wysokości, aż do 320 mm, jednocześnie w niewielkim stopniu ograniczając zajmowaną przestrzeń stołu obrabiarki.

Innym rozwiązaniem łap umożliwiającym zamocowanie przedmiotu w zmien- nym zakresie są łapy z nastawną bezstopniową regulacją wysokości. Wykonane w postaci odkuwki, posiadają one odpowiednio wygięty kształt, który pozwala na zamocowanie bez dodatkowych podpórek czy podkładek przy niewielkich przestrzeniach, jakie zajmuje mocujący zestaw. Ze względu na zwartą i sztywną konstrukcję jest to mocowanie przenoszące największe siły zamocowania. Przykład zamocowania przedmiotu z wykorzystaniem tego typu łap pokazano na rys. 12.26.



Rys. 12.26. Łapa dociskowa nastawna z bezstopniową regulacją wysokości [15]

W przypadku, gdy wysokość przedmiotu nie pozwala na zastosowanie powyższych rozwiązań konieczne jest zwiększenie punktu podparcia poprzez wprowadzenie specjalnych elementów tzw. podpórek. Posiadają one specjalnie nacięte występy stanowiące powierzchnie podparcia dla elementów mocujących np. łap dociskowych. Poprzez specjalne ukształtowanie powierzchni nośnej podpórki możliwe jest uzyskanie bezstopniowej zmiany wysokości. Jest to realizowane poprzez dwa nacięcia powierzchni ząbkowych pod różnymi kątami do dwóch prostopadłych do podstawy ścian. Przykłady takich rozwiązań zaprezentowano na rys.12.27.



Rys. 12.27. Przykłady wykorzystania różnych podpórek przy mocowaniu łapami [15]

Podobnie jak w przypadku zamocowania podczas ustalania położenia przedmiotu obrabianego często potrzebna jest możliwość zmiany wysokości elementu ustalającego. Możliwość zmiany zapewniają w tym zakresie podpórki śrubowe (rys.12.28).



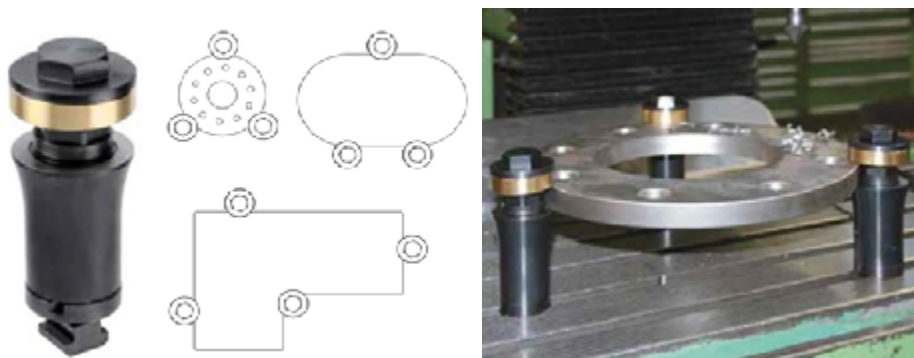
Rys. 12.28. Przykłady konstrukcji podpórek śrubowych stosowanych przy obróbce ubytkowej [15]

Za ich pośrednictwem możliwe jest uzyskanie, przy standardowo oferowanych rozwiązaniach, podwyższenie punktu podparcia do ponad 1250 mm nad powierzchnię stołu. Istotne jest, że elementy te są stosunkowo niewielkich rozmiarów, przez co nie ograniczają istotnie powierzchni roboczej stołu obrabiarki. Wyposażone mogą być również w magnetyczne wkładki zapobiegające ich samoczynne-

mu przewracaniu się w momencie ustawiania na nich przedmiotu obrabianego. W gnieździe podpórki znajduje się otwór, w którym możliwe jest umieszczenie różnego rodzaju podpór punktowych jak kołki oraz wkładki z powierzchniami pryzmowymi czy kulistymi. Podpórki te dają się składać w stosy, przez co można znacznie zwiększyć zakres ich zastosowania. Wykonane mogą być również ze stopów aluminium tak, aby nie odkształcać powierzchni stołów i oprzyrządowania wykonanego ze stopów aluminium.

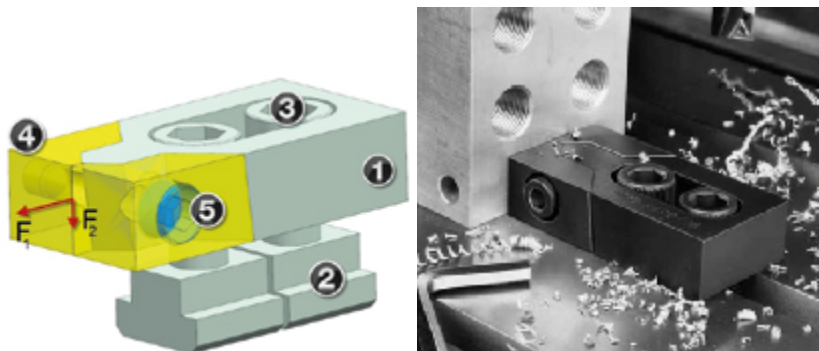
Zestawieniem zarówno funkcji ustalającej i mocującej w jednym elemencie może być przykład sworzni mocujących. Sworznie mocujące są mocowane na stole maszyny za pomocą wpustu przesuwnego poprzez dokręcenie nakrętki znajdującej się w korpusie sworznia. W górnej części sworznia znajduje się płaska powierzchnia czołowa, na której można oprzeć element. W części środkowej znajduje się powierzchnia cylindryczna, zadaniem której jest ustalenie położenia przedmiotu. Zakończenie elementu stanowi śruba wraz z pierścieniem mosiężnym. Za ich pomocą na przedmiot przenoszona jest siła mocująca. Dzięki zastosowaniu mosiądzu powierzchnia zamocowywanej części chroniona jest przed uszkodzeniem wskutek sił nacisku. Przykład tego typu elementu mocującego wraz z przykładami rozmieszczenia na obrabianych elementach pokazuje rys.12.29.

Ważną funkcją tego typu elementów jest nie tylko redukcja liczby elementów potrzebnych do zamocowania przedmiotu podczas obróbki, ale również podniesienie obrabianego przedmiotu ponad powierzchnie stołu do 80 mm w standardowych rozwiązaniach. W wielu przypadkach jest to konieczne ze względu na ograniczenia przesuwu wrzecion w osi Z, co uniemożliwia obróbkę elementów o małej grubości oraz wymusza stosowanie innych elementów pośrednich co może wpłynąć na zwiększenie błędów wykonania. Za pomocą sworzni mocujących możliwe jest mocowanie elementów w zakresie od 8 do 40 mm grubości, jednocześnie unosząc je ponad stół obrabiarki, umożliwiając przeprowadzenie takich operacji jak wiercenie czy gwintowanie otworów przelotowych.



Rys. 12.29. Przykład sworzni mocującego oraz zasady rozmieszczenia tych elementów w celu zamocowania przedmiotu obrabianego [15]

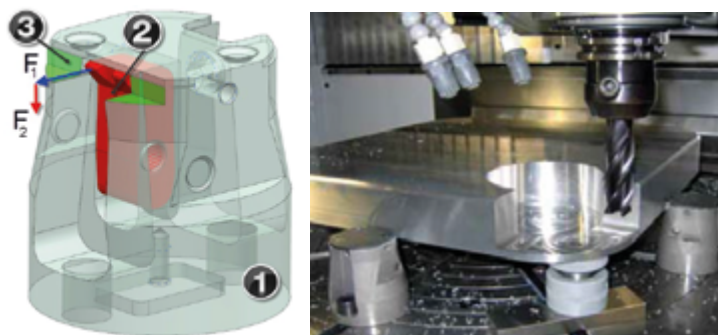
Obróbka wielu elementów wymaga pełnego dostępu całej powierzchni górnej półfabrykatów leżących na stole obrabiarki, przez co umiejscowienie na niej łap dociskowych jest niemożliwe. W takich sytuacjach przedmiot obrabiany może być zamocowany z wykorzystaniem docisków bocznych z systemem mocowania śrubowego. Sprawdzą się one wszędzie tam, gdzie nie są wymagane duże siły prostopadłe do powierzchni stołu a wymagane są duże siły równoległe. Budowę docisku bocznego wraz z przykładem jego wykorzystania podczas obróbki zaprezentowano na rys.12.30.



Rys. 12.30. Model docisku bocznego niskiego BYK firmy AMF oraz przykład zamocowania [15]

Po ustaleniu położenia elementu podstawowego docisku 1 za pomocą śrub 3 i elementów 2 w rowkach teowych obrabiarki, następuje przeniesienie, poprzez elementy ruchome 4, sił do przedmiotu obrabianego wywołanych napięciem śruby 5. W wyniku tego powstaje siła, której wypadkowe F_1 oraz F_2 mocują przedmiot ze stosunkiem sił około 25:1.

Zastosowanie przedstawionego powyżej docisku bocznego nie zawsze jest możliwe, szczególnie wtedy, gdy ogranicza to dostępna wysokość, jaką może mieć element mocujący. Powyższy docisk charakteryzuje się minimalną wysokością równą 25 mm, co znacznie ogranicza obróbkę, szczególnie, gdy część obrabiana jest w jednym zamocowaniu. W takich przypadkach należy korzystać z innych rozwiązań. Dobrym efektem może być zastosowanie docisków bocznych hakowych, jak na rys.12.31. Docisk wykonany w postaci wałka 1 posiada specjalne gniazdo, w którym za pomocą kołka zamocowany jest hak 2, dociskany śrubą do mocowanego przedmiotu obrabianego z siłami F_1 oraz F_2 w stosunku 12:5. Przedmiot opiera się o specjalnie przygotowane powierzchnie w rowku 3 wykonanym w górnej powierzchni o głębokości równej 5 mm. Zastosowanie takiego elementu nie tylko znacząco pozwala obniżyć wysokość, na jakiej zamocowany jest przedmiot, tym samym zwiększając dostępność obróbki dla narzędzi, ale również zapewnia podniesienie przedmiotu obrabianego ponad powierzchnię stołu obrabiarki umożliwiając obróbkę otworów przelotowych.



Rys. 12.31. Widok docisku bocznego hakowego oraz przykład zastosowania [15]

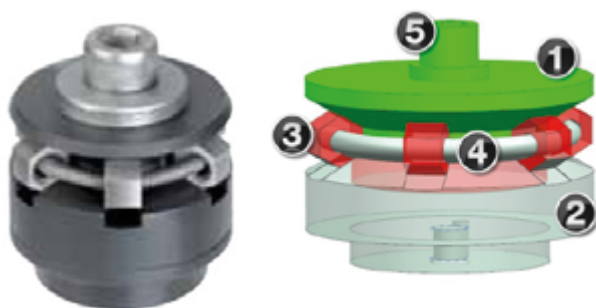
W przypadkach obróbki gdzie wysokość, na której można zastosować elementy mocujące musi być jak najmniejsza, można zastosować dociski boczne sprężyste zaprezentowane na rys.12.32.



Rys. 12.32. Docisk boczny sprężysty [15]

Zasada działania napinacza tego docisku opiera się na specjalnej konstrukcji palców – jednego sztywnego umieszczonego centralnie oraz dwóch sprężystych umieszczonych po bokach napinacza. Poprzez przekręcenie elementu śruby mimośrodowej za pomocą klucza w pierwszej fazie następuje kontakt sprężystych palców, które dociskają z siłą F_2 przedmiot obrabiany aż do momentu zetknięcia się jego z powierzchnią podparcia. W drugiej fazie sztywny palec centralny dokładnie pozycjonuje element mocowany wprowadzając siłę napinającą F_1 równą około 4000 N.

W wielu przypadkach obróbki części ustalenie przedmiotu odbywa się za pośrednictwem powierzchni cylindrycznych, przygotowanych wcześniej w przedmiocie obrabianym jako powierzchnie bazowe. Aby możliwe było wykorzystanie takich baz jednym ze sposobów zamocowania jest wykorzystanie specjalnego elementu rozprężnego w postaci napinacza centrującego przedstawionego na rys.12.33.



Rys. 12.33. Napinacz centrujący konstrukcji AMF [15] oraz model geometryczny

Składa się on z dwóch powierzchni stożkowych 1 i 2, które zблиżają się do siebie poprzez pokręcenie śrubą 5 umieszczoną centralnie. Pomiędzy powierzchniami stożków na sprężystym pierścieniu 4 umieszczone są elementy oporowe 3 przesuwające się promieniowo po stożkach podczas ich zблиżania. Umieszczenie napinacza centrującego w otworze powoduje przeniesienie siły napięcia na element obrabiany i trwałe jego zamocowanie. Napinacze centrujące charakteryzują się wysoką powtarzalnością na poziomie $\pm 0,025$ mm, co wpływa na wysoką dokładność wytwarzanych struktur.



Rys. 12.34. Różne przykłady docisków szybko-mocujących stosowanych przy obróbce metali [17]

W licznych procesach technologicznych wykorzystuje się dociski szybko-mocujące. Oprzyrządowanie to jest dobrym rozwiązaniem wszędzie tam, gdzie wymagana jest szybka, bezpieczna oraz łatwa zmiana przedmiotu obrabianego. Zastosowanie tego rozwiązania pozwala na zmianę przedmiotu obrabianego bez konieczności odkręcania elementów oprzyrządowania od stołu maszyny technologicznej, co znacznie skraca czas przebrojenia maszyny. Opisywane przyrządy wykonują ruch w dwóch płaszczyznach – wertykalnej oraz horyzontalnej. Ich duża siła mocowania oraz wysoka wytrzymałość poszczególnych części składowych pozwalają na **zamocowanie półfabrykatów** o dużej masie. Zastosowanie

docisków szybkococujących pozwala na mocowanie elementów o wysokości 180 mm, a różne rodzaje dostępnych końcówek zapewniają precyzyjne zamocowanie różnego rodzaju powierzchni. Tego typu rozwiązanie sprawdza się również przy obróbce mechanicznej na wszelkiego rodzaju maszynach posiadających płyty montażowe z otworami gwintowanymi bądź też rowki teowe. Przykłady takich docisków pokazano na rys. 12.34.

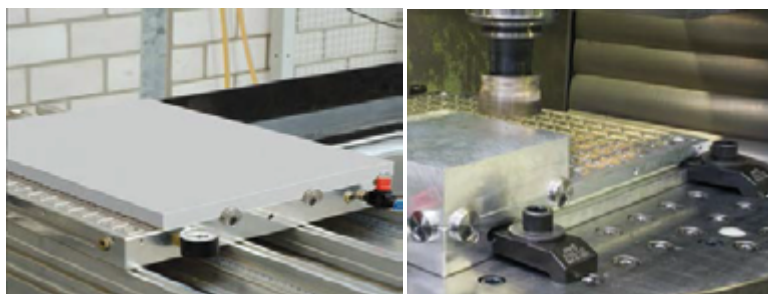
Przedstawione elementy mocujące stanowią jedynie wąską grupę spośród dostępnych rozwiązań oferowanych przez producentów oprzyrządowania. Jednak ze względu na prostotę działania, pewność zamocowania, charakteryzującą się niezmiennością podczas obróbki, oraz wartości uzyskiwanych sił zamocowania, przy jednoczesnym niskim koszcie, stanowią o ich najczęstszym wyborze przy różnego rodzaju profilach produkcji konstrukcji lotniczych.

12.5. Ustalenie i mocowanie przedmiotów o małej sztywności

Części lotnicze wytwarzane poprzez obróbkę skrawaniem w większości charakteryzują się niewielkimi polami przekrojów poprzecznych ścian, ich obróbka stanowić może spore utrudnienie z uwagi na niewielką sztywność tych elementów. Sztywność ta jest funkcją zmienną i obniża się wraz ze zmniejszaniem się przekrojów obrabianych elementów. Oczywiście istnieje wiele strategii obróbki mających na celu zmniejszenie wpływu na efekty obróbki skrawania sił pochodzących wprost z procesu obróbki. Często wprowadzenie standardowych rozwiązań w zakresie zamocowania może być przyczyną powstawania dużych deformacji konstrukcji podczas obróbki i bezpośrednio po niej. Dlatego też w przypadkach, gdy zawodzi standardowe podejście należy rozważyć inne sposoby zamocowania przedmiotu obrabianego.

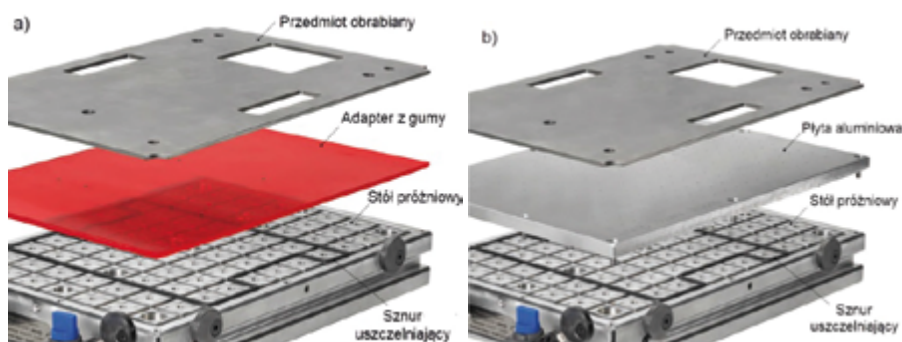
Jednym z podstawowych elementów tej strategii jest zmniejszenie jednostkowych nacisków wywieranych przez elementy mocujące poprzez zwiększenie powierzchni kontaktowej elementów mocujących z przedmiotem obrabianym. Ważnym jest, aby jakość wykonania takich elementów była odpowiednio wysoka. Stosowanie zwiększonych wymiarów elementów mocujących powoduje z kolei ograniczenia w dostępności do obrabianych powierzchni i wymusza konieczność wprowadzania dodatkowego zamocowania, co również może przyczynić się do powstawania błędów. Dodatkowo przy obróbce na maszynach sterowanych numerycznie położenie elementów mocujących musi być ściśle określone ze względu na programy obróbki pisane w środowiskach CAM, gdzie dokładne ich położenie jest kwestią kluczową. Zmiana miejsca zamocowania dodatkowo komplikuje etap tworzenia tych programów i wymusza opisywanie stosownych procedur dla operatorów nadzorujących pracę maszyn CNC. Dlatego też, jeżeli to możliwe, należy wykorzystywać inne sposoby zamocowania elementów o małej sztywności. Pierwszym sposobem jest zastosowanie podciśnienia, jako czynnika wywołującego zamocowanie przedmiotu. W tym celu przedmiot obrabiany należy

umieścić na specjalnie przygotowanym stole podciśnieniowym. Stół połączony przewodami z pompą systemem regulatorów i zaworów po ustawieniu na nim przedmiotu unieruchamia przedmiot z siłą zależną od wielkości pola powierzchni przylegania oraz wartości podciśnienia. Siła zamocowania zależy również od struktury powierzchni.



Rys. 12.35. Ustalenie przedmiotu na stole podciśnieniowym i przykład obróbki frezowaniem [16]

Dokładne ustalenie położenia przedmiotu obrabianego w przestrzeni stołu może odbywać się za pomocą specjalnych elementów pozycjonujących, mocowanych z boku płyty lub w rowkach podciśnieniowych. Przykład stołu podciśnieniowego pokazano na rys.12.35. Systemy mocowania próżniowego używane są przede wszystkim przy obróbce metali nieżelaznych. Umożliwiają one szybką i łatwą obróbkę i są kompatybilne z obrabiarkami CNC. Technikę próżniową stosuje się tam w połączeniu ze specjalnymi systemami manipulacyjnymi, np. w celu ustalenia płyty aluminiowej w jednym położeniu i umożliwienia jej obróbki ze wszystkich stron. Wpływa to na zwiększenie wydajności i ekonomiczności, ponieważ tego typu mocowanie nie powoduje żadnych uszkodzeń obrabianego przedmiotu i pozwala na znaczne zaoszczędzenie czasu i wysiłku w porównaniu z koniecznością tradycyjnego ustalenia przedmiotu.



Rys. 12.36. Zwiększenie siły zamocowania poprzez zastosowanie adapterów: a) gumy; b) płyty aluminiowej [16]

Zwiększenie szczelności pomiędzy mocowanym elementem a płytą dociskową możliwe jest poprzez zastosowanie specjalnych adapterów wykonanych w postaci gumowej przekładki lub aluminiowej płyty. Przykłady takich rozwiązań pokazano na rys. 12.36. Lepsze przyleganie wywołane jest zastosowaniem podatnego materiału gumowego, w którym wykonano kilka otworów, przez które powietrze jest odsysane do stołu próżniowego. Guma ze względu na swoje właściwości odkształca się zapewniając lepsze przyleganie. Podobny efekt można uzyskać dzięki płycie aluminiowej, w której wykonano serię równo rozmieszczonych otworów o niewielkiej średnicy, przez co zwiększa się ilość punktów, przez które odsysane jest powietrze.

W przypadku konieczności zamocowania elementów o małej sztywności, których powierzchnie bazowe nie są płaskie, przez co nie dają dobrego przylegania w układach próżniowych, do ich zamocowania możliwe jest wykorzystanie elementów mocujących wykonanych z politereftalanu butylenu (PBT). Zastosowanie takich elementów redukuje masę oprzyrządowania gdyż są one o $\frac{1}{4}$ lżejsze od odpowiednich gabarytów elementów aluminiowych i aż o $\frac{1}{10}$ lżejsze od wykonanych ze stali.

Za ich pomocą możliwe jest zmniejszenie sił zamocowania do około 500 N, w zależności od wybranego układu dźwigni podpory łapy dociskowej oraz momentu wywołanego przez nakrętkę dociskową. Zastosowanie łap z PBT może stanowić alternatywę także wszędzie tam, gdzie obróbka jest prowadzona w agresywnym środowisku. Przykład zestawu takich elementów mocujących wraz z przykładowym zamocowaniem przedmiotu przedstawiono na rys.12.37.



Rys. 12.37. Zestaw elementów mocujących z PBT oraz przykład zamocowania na elemencie cienkościennym [15]

Przedstawione rozwiązania nie wyczerpują wszystkich możliwości w zakresie zamocowania elementów cienkościennych. Przedstawione przykłady stanowią najczęstsze rozwiązania stosowane w przemyśle. Kwestia zamocowania struktur o małej sztywności jest sprawą trudną i wymaga niejednokrotnie specjalistycznego oprzyrządowania zapewniającego pewność zamocowania.

12.6. Ustalenie i mocowanie przedmiotów wielkogabarytowych

Obróbka elementów wielkogabarytowych wymusza na technologach konieczność korzystania ze specjalnych rozwiązań zwłaszcza w przypadkach, gdy obrabiane elementy znacznie przekraczają wielkość pola roboczego obrabiarki.

Do zamocowania elementów, dla których wymagane jest zastosowanie dużej siły zamocowania, stosuje się najczęściej układy oparte o napęd hydrauliczny. Budowa takich układów i stopień ich skomplikowania jest zależny od wielkości przedmiotu obrabianego a tym samym ilości punktów, w jakich należy rozmieścić punkty zamocowania. **Zastosowanie hydraulicznych układów mocujących wpływa na znaczący wzrost wydajności produkcji, poprzez zredukowanie czasu potrzebnego na zamocowanie i odmocowanie obrabianego przedmiotu, oraz pozwala na zautomatyzowanie tych czynności poprzez integrację pracy robotów i oprzyrządowania.** Systemy hydrauliczne zapewniają łatwą zmianę obrabianego przedmiotu, dzięki elementom mocującym z uchylnymi bądź obrotowymi ramionami dociskowymi. Przykład takiego systemu zamocowania pokazano na rys.12.38.



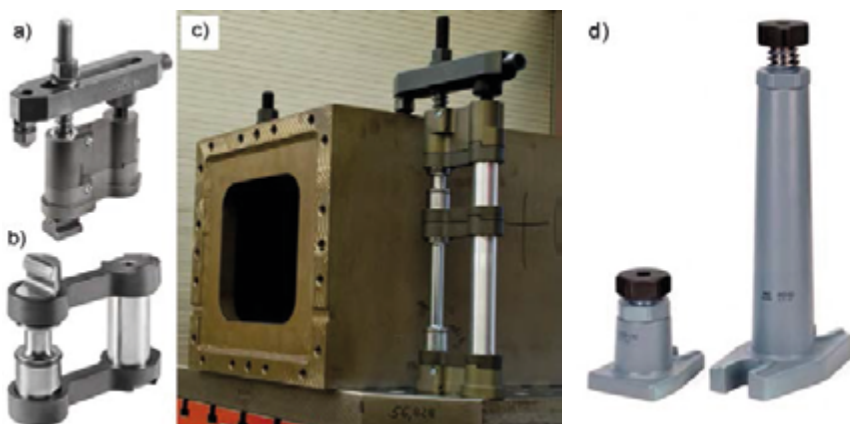
Rys. 12.38. Przykłady zamocowania przedmiotów za pomocą układów hydraulicznych [18]

Zamocowanie przedmiotu podczas obróbki za pomocą układu hydraulicznego wpływa na wzrost bezpieczeństwa czynnego oraz zminimalizowanie prawdopodobieństwa wypadku, spowodowanego złym lub niepewnym zamocowaniem. Dodatkowo przyczynia się do zmniejszenia wymiarów i masy elementów mocujących – wysokociśnieniowe elementy dociskowe mają kilkakrotnie mniejsze wymiary, niż tradycyjne układy mocowania. Za zastosowaniem mocowania hydraulicznego przemawia fakt dużej liczby typów układów dociskowych i szerokiej gamy akcesoriów dodatkowych. Dzięki takiej budowie można modułowo przyłączać poszczególne punkty mocowania i redukować ich ilość w miarę potrzeb.

Obróbka przedmiotów wielkogabarytowych to w wielu przypadkach konieczność umieszczenia zamocowania na znacznych wysokościach nad powierzchnią

stołu obrabiarki. Wzrost wysokości, na jakiej jest wykonane zamocowanie, wymusza zastosowanie elementów mocujących o zwiększonej sztywności, ze względu na możliwość wystąpienia odkształceń w elementach mocujących pochodzących od sił, z jakimi oprzyrządowanie oddziałuje na przedmiot obrabiany. Spadek wartości siły zamocowania może być przyczyną uszkodzeń, zarówno elementów mocujących jak i przedmiotu obrabianego, a w krytycznych momentach maszyny technologicznej. Aby uniknąć takich sytuacji przy mocowaniu przedmiotów o znacznej wysokości należy korzystać ze specjalnych systemów mocowania blokowego

Systemy te składają się ze specjalnych modułów, które są ze sobą łączone za pomocą specjalnych powierzchni kształtowych w większe formy. Podstawę stanowi element fundamentowy przytwierdzony do powierzchni stołu poprzez rowek teowy za pomocą śruby. Następnie za pomocą specjalnie wykonanego gniazda łączy się poszczególne elementy pośrednie z jednostką mocującą w zwartą całość. Odbywa się to za pomocą specjalnego klucza w sposób zapewniający stabilność konstrukcji.



Rys. 12.39. System mocowania blokowego: a) jednostka mocująca; b) element pośredni; c) przykład zamocowania przedmiotu poprzez system blokowy; d) podpora śrubowa [18]

Zastosowanie przedstawionego na rys.12.39a-c systemu blokowego ma zastosowanie przy mocowaniu przedmiotów na wysokości od 12,5mm do 340 mm. Przy większych wysokościach należy korzystać z podpór śrubowych (rys.12.39d), które dają możliwość zwiększenia wysokości zamocowania przy standardowo oferowanych rozwiązaniach do 1250 mm. Istnieje możliwość wykonania dowolnej wysokości podpory według indywidualnych wytycznych przez co jest ona praktycznie nieograniczona co oczywiście wiąże się ze zwiększonym kosztem wykonania.

Obróbka elementów cylindrycznych o znacznych średnicach i długościach stanowić może istotny problem ze strony zamocowania takich przedmiotów w przestrzeni obróbczej. Owalny kształt oraz duże średnice, na jakich należy dokonać

zamocowania, wymagają od konstruktorów oprzyrządowania doboru specjalnych rozwiązań w tym zakresie. Zastosowanie elementów pryzmowych znacznych wymiarów i budowa specjalnych przyrządów jest rozwiązaniem kosztownym. Dlatego w przypadkach mocowania elementów o dużych średnicach stosuje się łańcuchowe elementy mocujące. Dają one możliwość wykorzystania ich zarówno na stole maszynowym, jak i na paletach napinających.

Montaż tego rodzaju zamocowania pokazanego na rys.12.40 odbywa się poprzez elementy podpór i haków mocujących do powierzchni stołu obrabiarki z wykorzystaniem rowków teowych. Wstępne ustawienie długości łańcucha oraz siły zamocowania następuje przy zaczeple za pomocą nakrętki radełkowej. Następnie na hakach mocujących uzyskuje się wymagany moment obrotowy dla danej siły mocowania. Wprowadzenie elementów przekładkowych z tworzywa sztucznego pomiędzy ogniwa łańcucha a przedmiot obrabiany chroni jego powierzchnię przed zniszczeniem podczas zamocowania. Mocowanie za pomocą łańcuchów zapewnia równomierne rozłożenie nacisku, co minimalizuje odkształcenie obrabianego elementu jednocześnie zapewniając duży zakres mocowanych średnic poprzez regulację ilości ogniw w łańcuchu mocującym.



Rys. 12.40. Zestaw do mocowania łańcuchowego oraz przykład zamocowania [18]

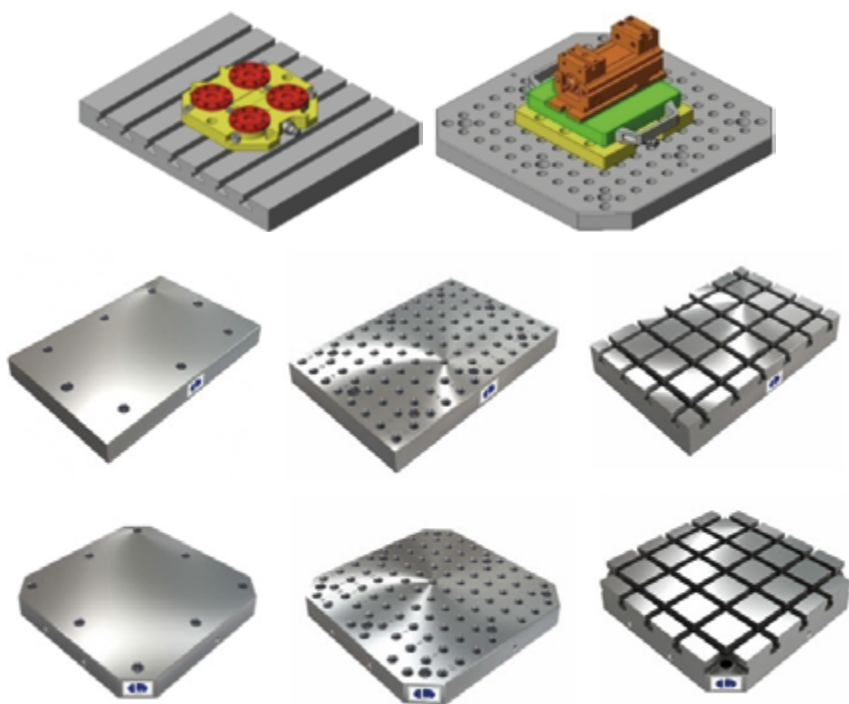
Wysoka siła zamocowania, która może osiągać wartość 40 kN decyduje o wyborze tego rozwiązania wszędzie tam, gdzie wymagane jest pewne zamocowanie przedmiotu obrabianego o średnicy do 1270 mm.

Nowoczesne maszyny sterowane numerycznie wymagają niezawodnych i pewnych systemów mocowania. Ich potencjał może być wykorzystany tylko w przypadku zastosowania niezawodnych, szybkich i dopasowanych do konkretnych potrzeb układów mocujących szczególnie przy obróbce elementów wielkogabarytowych.

12.7. Paletyzacja i systemy bazująco-mocujące oparte o stałe punkty zerowe

Zwiększenie efektywności procesu wytwarzania struktur lotniczych może być realizowane poprzez znaczącą redukcję czasów przestoju centrów obróbczych powodowanych koniecznością przebrojenia pomiędzy obróbką kolejnych części. Realizację tego zadania można osiągnąć wprowadzając paletowe systemy załadownicze bazujące na tzw. stałych punktach zerowych. Podstawowymi elementami tego systemu są palety i system punktów bazująco-mocujących.

Istnieje wiele rodzajów systemów paletowych. Można je podzielić na systemy jednostronnego i wielostronnego zamocowania. Przykłady takich rozwiązań zaprezentowano na rys.12.41. Wybór optymalnego rozwiązania pod względem systemu palet zależy od wielu czynników. Przede wszystkim ważne jest, czy palety przenoszone będą pomiędzy przestrzeniami obróbkowymi różnych obrabiarek, czy też ich przepływ dotyczyć będzie pojedynczych stanowisk. W takich rozwiązaniach stawia się na maksymalne wykorzystanie przestrzeni obróbkowej obrabiarki w taki sposób, aby za pośrednictwem systemu paletowego możliwe było jednoczesne zamocowanie jak największej liczby obrabianych elementów.



Rys. 12.41. Systemy paletowe jednostronne mocowane bezpośrednio na stole i na specjalnych płytach pośrednich oraz przykłady różnej konstrukcji palet [19]

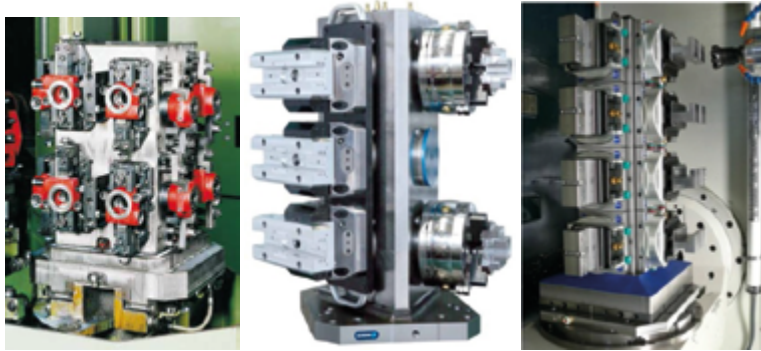
Wymiary palet zależą przede wszystkim od wymiarów gabarytowych obrabianych przedmiotów i mogą być dowolnie do nich dostosowane. Zastosowanie paletowych systemów zamocowania zapewnia możliwość prowadzenia czynności, związanych z zamocowaniem i zmianą zamocowania, przedmiotów po obróbce poza obrabiarką, co znacznie podnosi efektywność obróbki. Możliwe staje się również przeniesienie przedmiotu obrabianego w przestrzeń innej maszyny technologicznej np. z centrum frezarskiego na szlifierkę bez konieczności zmiany zamocowania. Zachowuje się przy tym jednakowe ustalenie przedmiotu (zasada jedności bazy) i niezmienność sił mocujących.

Bardziej efektywnym rozwiązaniem jest zastosowanie w przypadku obrabiarek poziomych ze stołem obrotowym systemu palet przestrzennych w postaci skrzyń kolumnowych oraz wsporników. W zależności od wielkości mocowanych przedmiotów możliwe jest stosowanie skrzyń kolumnowych dwustronnych, trójstronnych, czterostronnych, sześć i ośmiostronnych zaprezentowanych na rys.12.42.



Rys. 12.42. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych paletowych skrzyń kolumnowych [19]

Poprzez wykorzystanie takich rozwiązań możliwe jest zwiększenie wydajności obróbki poprzez jednoczesne zamocowanie dużej liczby obrabianych elementów w jednej przestrzeni obróbczej. Na powierzchniach bazowych można poprzez układ wykonanych otworów rozmieścić dowolne elementy mocujące zarówno mechaniczne, pneumatycznie, hydraulicznie i magnetycznie a bazując na systemach stałych punktów bazowych dowolne oprzyrządowanie takie jak uchwyty szcękowe czy imadła. Przykłady takich rozwiązań zaprezentowano na rys.12.43.

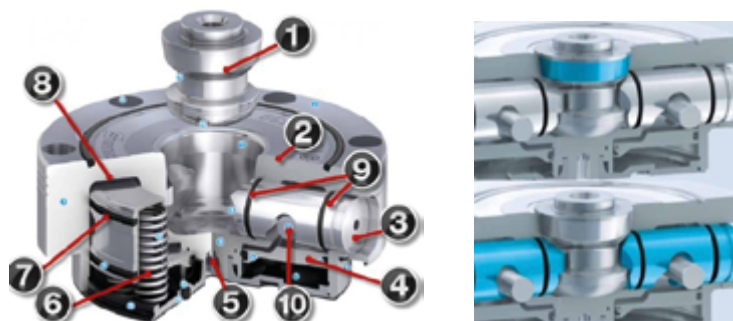


Rys. 12.43. Przykłady zamocowanie przedmiotów na skrzyniach kolumnowych [16,21]

Wykorzystanie funkcjonalności powyższych rozwiązań jest związane z użyciem, jako łącznika pomiędzy paletą a stołem obrabiarki, odpowiedniego systemu bazującego – mocującego, tzw. stałego punktu zerowego. Obecnie istnieje bardzo wiele rozwiązań konstrukcyjnych oferowanych przez producentów oprzyrządowania i każdy z nich ma odrębne rozwiązanie chronione patentami. Idea ich jest jednak ta sama. Chodzi tu o uzyskanie powtarzalnego i trwałego połączenia rozłącznego dwóch elementów, z których jeden stanowi specjalnego kształtu sworznię a drugi gniazdo z nim współpracujące. Kształt powierzchni sworzni oraz gniazd jak również sposób wzajemnego pozycjonowania i zamocowanie elementów stanowi unikalne rozwiązanie chronione prawem patentowym. Pomimo podobieństw w budowie oferowanych systemów powtarzalność pozycjonowania wynosić może od 5 do 2 μm .

Budowa systemu VERO-S firmy Schunk została zaprezentowana na rys.12.44. Sworznię bazujący, 1 tzw. ściągacz, może być przykręcony do palety, imadła lub innego oprzyrządowania, albo bezpośrednio do przedmiotu obrabianego. Dzięki jego zaokrąglonemu czółu nie jest konieczne dokładne ustawianie palety lub przedmiotu w sposób równoległy i współosiowy do otworu w module mocującym 2. Odchylenie osi sworzni od osi otworu może wynosić 20°. Po wprowadzeniu sworzni w światło otworu następuje jego centrowanie prowadzące do bazowania przedmiotu. Siła, z jaką sworznię jest zamocowany w gnieździe wytwarzana jest przez pakiet sprężyn 6, współpracujących z tłokiem 4, w którym zamocowany jest sworznię pośredni 10. Sworznię ten przemieszcza się w kanale kształtowym wykonanym w sworzniach mocujących 3. W wyniku ruchu sworzni mocujących w kierunku promieniowym w otworze bazowym dochodzi do kontaktu ich specjalnie wykonanych powierzchni z sworzniem bazującym. Dalszy ruch sworzni mocujących poprzez powierzchnie kształtowe powoduje przemieszczanie do środka gniazda sworzni bazującego aż do momentu, w którym płaszczyzna przyrządu lub przedmiotu mocowanego nie zetknie się z powierzchnią czółową modułu.

Ponieważ siła zamocowania jest utrzymywana poprzez nacisk pakietu sprężyn, na działanie systemu nie ma wpływu ewentualny zanik ciśnienia lub innego czynnika roboczego, jak może to mieć miejsce w innych rozwiązaniach.



Rys. 12.44. Budowa modułu VERO-S oraz etap bazowania i mocowania w module [21]

Wartość siły zamocowania jest pochodną siły nacisku pakietu sprężyn oraz przełożenia, do jakiego dochodzi wskutek wzajemnego kontaktu współpracujących elementów i może ona wynosić 9 kN, co dodatkowo może być zwiększone poprzez dostarczenie sprężonego powietrza pod tłok do wartości 40-150 kN na jeden moduł.

Luzowanie systemu odbywa się poprzez wprowadzenie sprężonego powietrza do górnej komory nad tłokiem 7. Jego ruch w dół powoduje ściągnięcie sworznia pośredniego, który przemieszcza na zewnątrz sworznie mocujące. W ten sposób sworznie bazowy jest swobodny i możliwe jest odmocowanie elementu obrabianego.



Rys. 12.45. System wielomodułowy w układzie tradycyjnym oraz możliwy błąd wywołany takim rozwiązaniem [21,32]

W celu zwiększenia siły zamocowania moduły można zestawiać w większej ilości zwiększając tym samym liczbę punktów mocujących. Budując systemy wielomodułowe należy stosować różne rodzaje sworzni mocujących. Rozróżnia się trzy typy sworzni przedstawionych na rys.12.45:

1. Bazujące w dwóch osiach (pełne utwierdzenie) („zero bolt”),
2. Bazujące tylko w jednej osi („sword bolt”)
3. Brak bazowania -swobodne przemieszczenie – przenoszenie tylko sił (free bolt).

W celu uniknięcia przestalenia w budowie systemu wielomodułowego możliwe jest wykorzystanie po jednym elemencie typu 1 i 2 jak pokazano na rys.12.46. Przyjęcie takiego rozwiązania jest prawidłowe w przypadku obróbki na paletach jednostronnych.



Rys. 12.46. Schemat rozmieszczenia sworzni bazujących w systemie wielomodułowym oraz przyczyna powstawania błędu podczas rotacji stołu [32]

Przy zastosowaniu takiego rozwiązania w zamocowaniu, np. skrzynki kolumnowej lub przedmiotu obrabianego, systemem wielomodułowym na stole obrotowym, wskutek oddziaływania ciepła może dojść do przesunięcia wirtualnej osi obrotowej kolumny w stosunku do osi geometrycznej stołu obrotowego, co pokazano na rys.12.46. Podczas zmiany położenia kąтового przedmiotu obrabianego wprowadzany jest błąd przyjmujący różne wartości zależnie od kąta obrotu podstawowego stołu.



Rys. 12.47. Opcjonalne rozmieszczenie pozwalające kompensować wpływ temperatury [32]

Rozwiązaniem tego problemu może być stosowanie układu sworzni bazujących tylko w jednej osi, pokazanych na rys.12.47. W przypadku takiego zamocowania każdy moduł w jednakowy sposób przejmuje zwiększenie wymiarów przedmiotu obrabianego lub palety. Przyjmuje się, że wartość błędów spowodowanych wpływem ciepła może osiągać $\pm 0,05$ mm na pojedynczy punkt mocowania co w konsekwencji może spowodować po obrocie stołu przesunięcie „punktu wierconego” w stosunku do położenia nominalnego równego 0,1 mm. Przedstawione powyższe rozwiązanie niweluje ten problem.

Przedstawione powyżej rozwiązania wpływają na realizację głównych celów, definiowanych przez nowoczesne systemy zamocowania, jak wysoka powtarzalność, niezmiennosc siły zamocowania, zdolność do przenoszenia dużych obciążeń, ale przede wszystkim możliwość realizacji zadań w zakresie automatyzacji procesów wytwarzania oraz znaczący wpływ na podniesienie ekonomiczności produkcji. Ten ostatni efekt, w wielu sytuacjach, wydaje się wątpliwy, ponieważ zastosowanie takich rozwiązań, choćby tych najmniej kosztownych, wiąże się ze znacznymi nakładami finansowymi przy ich zakupie. Jak pokazują jednak przeprowadzone analizy w tym zakresie, wdrożenie takich rozwiązań daje wymierne efekty w postaci redukcji czasów przygotowawczo-zakończeniowych a ich realny zwrot może nastąpić już po 2 latach przy jednozmianowej produkcji, co przemawia za zastosowaniem tego rodzaju oprzyrządowania, szczególnie przy produkcji seryjnej i masowej.

Literatura

1. Dobrzański T.: *Uchwyty obróbkowe poradnik konstruktora*, WNT 1987 wyd.7.
2. Feld M.: *Uchwyty obróbkowe*, WNT 2002
3. Habrat W., Wdowik R.: *Ustawianie maszyny sterowanej numerycznie*, *Pomiary Automatyka Robotyka* 2/2012, s. 52-57.
4. Jacniacka E., Semotiuk L.: *Powtarzalność mocowania jako składnik budżetu niepewności pomiaru sondą przedmiotową na obrabiarkach CNC*, *Mechanik* 5-6 (2012), s. 456-459.
5. Jacniacka E., Semotiuk L.: *Doświadczalne metody wyznaczania niepewności pomiaru sondami przedmiotowymi*, *Eksploatacja i Niezawodność*, Vol. 15, No. 3, (2013), s. 246-252.
6. Józwick J., Włodarczyk M.: *Obróbka wirnika turbiny Cz. 1. Komputerowo wspomaganie projektowa nie technologii w środowisku NX*, *Mechanik*, nr 8-9, (2013) s. 371-380.
7. Kamieńska-Krzowska B., Semotiuk L., Czerw M.: *Analiza możliwości zastosowania sondy przedmiotowej do kontroli czynnej na pionowym centrum obróbkowym FV 580A*, *Acta Mechanica et Automatica*, Vol. 1, no. 2, (2007), s. 19-24.

8. Kawalec A., Magdziak M., Cena I.: *Pomiar powierzchni swobodnych na obrabiarce CNC przy uwzględnieniu zmian geometrii narzędzia skrawającego*, Mechanik 1 (2011), s. 57.
9. Majda P.: *Pomiary i kompensacja błędów geometrycznych obrabiarek CNC*, Inżynieria Maszyn, R. 16, z. 1-2, (2011), s.126-134.
10. Oczóś K.E., Habrat W.: *Doskonalenie procesów obróbki ściernej*, Mechanik 8-9, (2010), s. 517-529.
11. Pajor M.: *Synergia nauki z przemysłem*. VIII Szkoła Obróbki Skrawaniem, Szczecin 2014.
12. SCHUNK Intec Sp. z o.o.: *Imadło KONTEC KSX – pewność mocowania w narzędziowni*, Forum Narzędziowe Oberon nr 3 (54), (2012), s. 8.
13. Włodarczyk M.: *Analiza wpływu sił skrawania oraz zamocowania na poziom naprężeń w aspekcie grubości ścianek wybranej konstrukcji kieszeniowej*, Postępy Nauki i Techniki nr 8, (2011), s.82-92
14. Zelinski P.: *Composites Machining for the F-35*, Modern Machine Shop, 8/3/2010

Katalogi i prospekty

15. Katalog AMF: Mechaniczne elementy mocujące, Katalog 2009/7-8PL.
16. Katalog AMF: Zero-point-systems, Katalog 2012.
17. Katalog AMF: Dociski szybko-mocujące ręczne i pneumatyczne, Katalog 2012.
18. Katalog AMF: Hydraulic clamping systems, Katalog 2011.
19. Katalog Leave Industrial: Tumbstones, sub palets, angle palets, 2010.
20. Katalog MATRIX: Clamping Systems, Katalog 2014/15
21. Katalog Schunk: Stationäre Spanntechnik – Stationary Workholding katalog 2013.
22. Prospekt DMG MORI: DMU Ecoline 2013.
23. Prospekt Renishaw: Probing systems for CNC machine tools 2014

Strony WWW producentów maszyn CNC i systemów pomiarowych

24. <http://www.bmuitalia.it>
25. <http://www.haimer.de/>
26. <http://www.hurco.com>
27. <http://www.hermlmachine.com>
28. <http://www.heidenhain.pl>
29. <http://www.jergensinc.com>
30. <http://www.lang-technik.de>
31. <http://www.marposs.com>
32. <http://zeroclamp.com>

13. Naprężenia własne w warstwie wierzchniej elementów wykonanych ze stopów aluminium i magnezu

Naprężenia własne są ważnym parametrem stanu warstwy wierzchniej, ponieważ wywierają istotny wpływ na właściwości eksploatacyjne wyrobów. Warstwa wierzchnia jest najbardziej odpowiedzialną częścią objętości danego elementu, która bezpośrednio współpracuje z innymi elementami oraz jest poddana działaniu różnorodnych czynników zewnętrznych. Jak najlepsze właściwości warstwy wierzchniej są pożądane z uwagi na wpływ tych właściwości na trwałość całego elementu. Naprężenia własne w warstwie wierzchniej równoważone są wewnątrz materiału, gdy nie działają już na niego siły zewnętrzne. Z uwagi na korzystne skutki występowania naprężeń ściskających, pożądane jest, by po ostatniej operacji procesu produkcyjnego w strefach przypowierzchniowych występował ściskający stan naprężeń.

Ściskające naprężenia własne występujące w warstwie wierzchniej korzystnie wpływają na wytrzymałość zmęczeniową gotowych wyrobów. Mogą powodować zmniejszenie oddziaływania karbów powierzchniowych oraz minimalizować bądź eliminować niekorzystne stany naprężeń technologicznych, powstałych wskutek wadliwie przeprowadzonych procesów obróbkowych, np. przypalenia powierzchni po szlifowaniu.

Naprężenia ściskające, występujące w warstwie wierzchniej, są szczególnie istotne dla elementów eksploatowanych w warunkach obciążenia zmiennego w środowisku korozyjnym, dla których wymagana jest duża wytrzymałość zmęczeniowa. Utrudniony jest bowiem proces przenikania czynnika korozyjnego przez powierzchnię.

W procesie eksploatacji naprężenia własne sumują się z naprężeniami wywołanymi obciążeniami zewnętrznymi. Generalnie, materiały konstrukcyjne (szczególnie kruche) mają większą wytrzymałość na ściskanie niż rozciąganie. Korzystne jest, zatem, by ściskające naprężenia własne zmniejszały w konstrukcjach naprężenia pochodzące od obciążeń generujących naprężenia rozciągające.

13.1. Znaczenie naprężeń własnych w warstwie wierzchniej elementów maszyn

W przypadkach nieprzewidzianego zachowania się konstrukcji powinien być brany pod uwagę wpływ oddziaływań naprężeń własnych. Mogą one pojawić się nawet w prostych operacjach technologicznych, takich jak cięcie piłą, kiedy to występuje zjawisko zaciskania się ostrza piły w czasie przecinania elementów, w których są ściskające naprężenia własne. Zmiany wymiarów i kształtów odlewów, kształtowników, czy odkuwek także wywołane są relaksacją naprężeń własnych. Często istnienie naprężeń własnych można zaobserwować w wyrobach szklanych, gdyż mogą być przyczyną niewyjaśnionych pęknięć wyrobów ze szkła lub tafli szklanych [1, 18].

Naprężenia własne mają wpływ na wytrzymałość zmęczeniową. Następuje wzrost tej wytrzymałości, gdy w warstwie wierzchniej materiału występują naprężenia ściskające, gdyż zapobiega to powstawaniu i rozwojowi występowania mikropeknięć. Naprężenia własne mogą wpływać na odporność na ścieranie, korozję oraz twardość. Jednak zbyt duża wartość naprężeń ściskających może prowadzić do zużycia adhezyjnego oraz powstawania znacznych naprężeń rozciągających wewnątrz materiału, równoważących naprężenia ściskające w warstwach przypowierzchniowych, co z kolei może zmniejszyć wytrzymałość zmęczeniową. Ogólnie można powiedzieć, że w materiale oczekiwany byłby taki stan naprężeń, który znosiłby się z naprężeniami pochodzącymi od sił zewnętrznych [9].

W niektórych przypadkach stan naprężeń własnych daje możliwość identyfikacji i oceny zastosowanych procesów technologicznych, a także ich parametrów. Analiza naprężeń własnych pozwala ocenić historię obciążenia. Przykładem może być badanie łożysk tocznych, gdzie analiza rozkładu naprężeń własnych prowadzi do określenia wartości występujących obciążeń [1].

Kontrola stanu naprężeń własnych jest szczególnie potrzebna w przypadku cienkich elementów, które mają niewielką odporność na wyboczenie, co prowadzi do znacznych zmian geometrycznych, nawet przy niewielkich wartościach tych naprężeń. Prawie wszystkie wytwarzane cienkie warstwy i nakładane powłoki oraz materiały wielowarstwowe cechują się znacznymi wartościami tych naprężeń. W przypadku obróbki cieplnej deformacja plastyczna może być powodowana gradientem temperaturowym lub przemianami fazowymi, a często kombinacją obu tych czynników podczas chłodzenia. Ponieważ różnica w objętości martenzytu i austenitu wynosi około 3% łatwo można wyznaczyć makronaprężenia struktury po zajściu przemiany fazowej [2, 20].

Wartość naprężeń, ich znak oraz rozkład, wpływają na właściwości wytrzymałościowe gotowych produktów, ponieważ mogą sumować się lub odejmować z naprężeniami roboczymi podczas eksploatacji konstrukcji. W wyniku ulepszenia warstwy wierzchniej wzrasta odporność na zużycie ścierne. Można osiągnąć

także takie korzyści jak wzrost wytrzymałości zmęczeniowej i trwałości. Przy tych samych obciążeniach można uzyskać nawet kilkukrotny wzrost trwałości. Wydłuża się czas, w jakim dany element lub zespół jest eksploatowany. Jeżeli wymogi technologiczne nie narzucają podniesienia czasu eksploatacji konstrukcji można zastosować „gorszy”, a tym samym tańszy, materiał lub zmniejszyć przekroje, a więc i masę, danego elementu, co ma kluczowe znaczenie, np. w przemyśle lotniczym.

Przemysł motoryzacyjny wymaga wnikliwego badania naprężeń własnych. Dotyczy to karoserii wykonanych z cienkich blach, ale także sprężyn stosowanych w zawieszeniach samochodów, gdyż naprężenia własne mają istotny wpływ na wytrzymałość zmęczeniową tych elementów oraz walory estetyczne [24].

Na naprężenia własne należy zwracać tym większą uwagę im bardziej odpowiedzialne zadanie spełnia badany obiekt lub wyrób. W przemyśle lotniczym wiele jest tzw. części krytycznych, decydujących o bezpieczeństwie lotu.

Stabilność kształtu odkuwek jest także powiązana ze stanem naprężeń własnych. Zaobserwowano ugięcia odkuwek wałów napędowych w czasie eksploatacji. Spowodowane jest to uwalnianiem naprężeń własnych w przypadku, gdy naprężenia te nie są rozłożone kołowo symetrycznie na powierzchni wału. Istnieją techniki umożliwiające kontrolę rozkładu tych naprężeń.

Znajomość rzeczywistego stanu naprężeń, czyli sumy naprężeń pochodzących od obciążeń zewnętrznych oraz naprężeń własnych, jest konieczna dla skutecznego zastosowania w praktyce osiągnięć mechaniki pękania. Znajomość odporności materiału na pęknięcie i wyniki pomiarów wielkości tych pęknięć stałyby się bezużyteczne bez wiedzy o rzeczywistym obciążeniu materiału w obszarze pęknięcia, gdyż niekiedy naprężenia własne przyjmują wartości bliskie granicy plastyczności [1].

Pomiary naprężeń własnych są nieodzownym elementem procedur określających żywotność konstrukcji, co ma szczególne znaczenie w konstrukcjach statycznie niewyznaczalnych.

W konstrukcjach lotniczych najszerzej stosowaną techniką montażową jest nitowanie, choć w ostatnim okresie zwiększa się zainteresowanie innymi sposobami łączenia. Niekiedy liczba nitów określana jest w milionach. Z punktu widzenia konstruktora, naprężenia montażowe, związane z odkształceniami montowanych elementów, można traktować jako naprężenia własne [10].

Naprężenia własne powinny być obiektem zainteresowania konstruktorów i technologów wszędzie tam, gdzie dochodzi do niejednorodnych odkształceń na zimno, albo gdzie technologia lub eksploatacja związana jest z nierównomiernym grzaniem lub chłodzeniem.

Spotkać się można także z pojęciem naprężeń pozostałych (są to naprężenia, które pozostają w ciele po zaprzestaniu działania sił zewnętrznych). Wylączając naprężenia powierzchniowe wszystkie inne są naprężeniami wewnętrznymi, własnymi.

Naprężenia klasyfikuje się na różne sposoby. Można za kryterium podziału przyjąć wielkość obszaru, w którym rozważa się naprężenia danego rodzaju. Wyróżnia się naprężenia pierwszego, drugiego i trzeciego rodzaju, choć podział ten jest już trochę archaiczny.

Naprężenia pierwszego rodzaju, zwane makronaprężeniami, równoważą się w obszarach, których wielkość odpowiada wielkości danego ciała. Rozcięcie elementu na części powoduje usunięcie makronaprężeń. Makronaprężenia powodują przesunięcie linii dyfrakcyjnych w określonym kierunku i na tej podstawie mogą być określane. Powstają one w następujących warunkach:

- podczas niejednorodnego nagrzewania i chłodzenia (np. przy spawaniu, wierceniu, lutowaniu),
- w czasie zabiegów obróbki plastycznej (np. walcowanie, kucie, przeciąganie, wyciskanie),
- w wyniku przemian fazowych,
- podczas odlewania i krzepnięcia metali i stopów,
- podczas chemicznej i mechanicznej obróbki powierzchni (szlifowanie, toczenie, frezowanie, polerowanie, kulowanie),
- podczas nanoszenia powłok elektrolitycznych,
- podczas montażu elementów stanowiących składowe konstrukcji i ich eksploatacji.

Eliminowanie niekorzystnych stanów naprężeń daje możliwość zwiększenia niezawodności urządzeń i maszyn, stąd tak istotna jest ich kontrola. Wytwarzanie korzystnych stanów wydłuża cykl życia wyrobu.

Naprężenia drugiego rodzaju, nazywane mikronaprężeniami, są to naprężenia własne, które równoważą się w obszarach rzędu wielkości ziaren. Istnieją dwa rodzaje mikronaprężeń: nieorientowane i orientowane w kierunku działania siły, która powoduje odkształcenie plastyczne. Mikronaprężenia nieorientowane wpływają na rozmycie linii dyfrakcyjnych, natomiast orientowane powodują przesunięcie linii i jednocześnie zmniejszenie jej natężenia. Mikronaprężenia powstają:

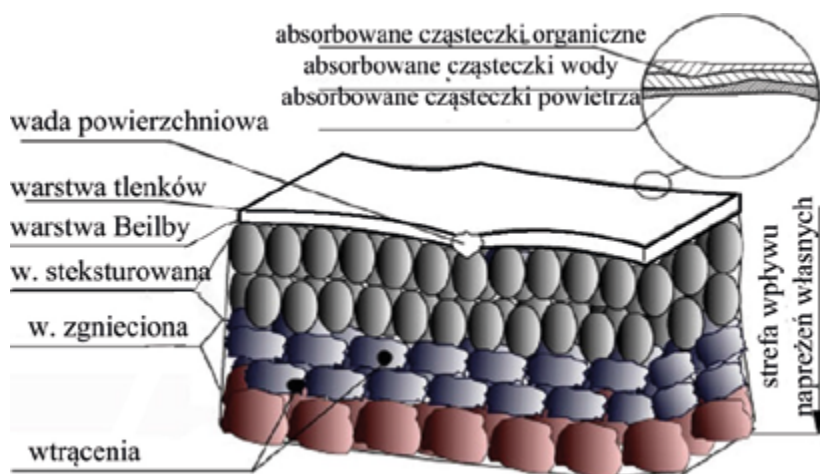
- podczas plastycznego odkształcenia próbki wskutek anizotropii krystalitów,
- podczas niejednorodnego nagrzewania lub chłodzenia (w tym procesie naprężenia mogą prowadzić do poślizgów, w wyniku których powstają mikronaprężenia, naprężenia te są większe dla próbek wielofazowych, ponieważ poszczególne fazy na ogół mają różne współczynniki rozszerzalności cieplnej),
- w czasie rozpadu przesyconych roztworów stałych (wydzielające się fazy podczas starzenia mają inną sieć niż osnowa stopu, co powoduje zmianę objętości właściwej dla poszczególnych faz, skutkiem czego jest powstawanie mikronaprężeń na granicach obszarów wydzielonej fazy i osnowy),
- podczas przemian strukturalnych zachodzących lokalnie, np. przy nawęglaniu lub azotowaniu stali (fazy w warstwie wierzchniej mają inną objętość właściwą niż pozostałe fazy, co także prowadzi do powstania mikronaprężeń).

Naprężenia trzeciego rodzaju, które mają ultramikroskopowy charakter, obejmują sobą objętość kilku krystalicznych siatek ziaren i są one wynikiem drgań cieplnych atomów oraz ich przesunięć z położenia równowagi. Powodują one osłabienie natężenia linii dyfrakcyjnych i wzrost tła dyfuzyjnego [1, 9, 11, 18, 21].

Z punktu widzenia współpracujących powierzchni kluczowy jest stan warstwy wierzchniej elementów. Fakt, że (80-90)% uszkodzeń zaczyna się na powierzchni elementu, lub bezpośrednio pod nią, zmusza do dbania o jakość warstwy wierzchniej i powierzchni produkowanych wyrobów. Jest to bezpośredni powód tworzenia warstw wierzchnich, które podwyższają odporność materiału na zewnętrzne obciążenia. Stan naprężeń własnych wpływa na wytrzymałość zmęczeniową, odporność na zużycie, pękanie warstwy wierzchniej.

Warstwa wierzchnia to ta część objętości danego elementu, położona bezpośrednio pod jego powierzchnią, wzięta wraz z tą powierzchnią, która charakteryzuje się właściwościami odmiennymi od właściwości rdzenia materiału.

Warstwa wierzchnia ma pewien stan energetyczny, tzn. ma określoną energię powierzchniową. Na jądro atomu położone w głębi struktury działają siły we wszystkich kierunkach, natomiast w jądrze na powierzchni energetycznie nie są wykorzystane wszystkie kierunki, a więc zmienia się stan energetyczny powierzchni, z czym wiąże się zmiana własności fizycznych (rys. 13.1). Warstwa, w której absorbowane są cząsteczki wody, powietrza lub organiczne, jest warstwą bezpostaciową. W strefie tej może wystąpić zjawisko Rebindera, które wywołuje dodatkowy wzrost ciśnienia oddziałującego na ścianki mikroszczelin, powoduje łączenie się mikronieciągłości w makronieciągłości (szczeliny, pęknięcia).



Rys. 13.1. Budowa warstwy wierzchniej



Rys. 13.2. Właściwości warstwy wierzchniej

Na rysunku 13.2 przedstawiono właściwości warstwy wierzchniej. Naprężenia własne należą do właściwości fizycznych tej warstwy. Największe znaczenie praktyczne mają naprężenia pierwszego rodzaju, dlatego istotny jest pomiar tego typu naprężeń w warstwie wierzchniej.

Naprężenia własne można wyznaczyć metodami teoretycznymi lub na drodze eksperymentalnej. Wyznaczenie naprężeń własnych metodami teoretycznymi związane jest z analizowaniem zagadnień teorii sprężystości, płynięcia plastycznego, umocnienia materiału oraz przepływów cieplnych, a także zjawisk rozszerzalności cieplnej materiałów, przemian fazowych, struktury i grubości warstwy wierzchniej. Różnorodne procesy zachodzące w materiałach sprawiają, że wyniki teoretyczne nie odzwierciedlają z zadowalającą dokładnością rzeczywistego stanu naprężeń własnych nawet w przypadku elementów o nieskomplikowanej geometrii. Dlatego alternatywą są tutaj metody doświadczalne [1].

Z racji charakteru wyznaczania naprężeń własnych metody pomiaru można podzielić na dwie grupy, wśród których wyróżnia się metody niszczące oraz nieniszczące. W pierwszym przypadku wyznaczenie naprężeń własnych w materiale wiąże się ze zniszczeniem materiału lub jego części. Dlatego też, pomiarów dokonuje się głównie na próbkach, a nie na gotowych elementach. Natomiast metody nieniszczące z racji swojego charakteru można stosować na liniach produkcyjnych, badając gotowe wyroby. Do najpopularniejszych metod nieniszczących pomiarów naprężeń własnych należą metody dyfrakcyjne, szczególnie rentgenograficzne, metody wykorzystujące efekt Barkhausena oraz metody ultradźwiękowe. Wszystkie odmiany metod niszczących pomiaru naprężeń opierają się na pomiarze

odkształcenia. Najczęściej stosowaną metodą niszczącą wyznaczania naprężeń własnych jest metoda zapewniająca pomiar odkształceń elementu poddanego trawieniu. Metoda ta jest stosowana do wyznaczania naprężeń w elementach o prostej geometrii, mogą to być próbki płaskie jak i cylindryczne. W przypadku próbek płaskich dokonuje się pomiaru strzałki ugięcia i na podstawie tych pomiarów wyznacza się naprężenia. Ugięcie próbki może być wyznaczane różnymi metodami, np. mikroskopii optycznej, skanowania laserem, pomiaru odkształceń czujnikiem zegarowym, profilometrami [17].

13.2. Naprężenia własne w przedmiotach obrabianych skrawaniem

Jedne z pierwszych badań związanych z naprężeniami własnymi po obróbce skrawaniem prowadzone były już w połowie ubiegłego wieku. W pracy [8] przeprowadzono podstawową analizę przy skrawaniu ortogonalnym stali niskowęglowej. Wykazano, że oddziaływanie mechaniczne i termiczne wpływa na stan naprężeń, jednak dominującym jest efekt mechanicznego oddziaływania w procesie skrawania.

Naprężenia własne mogą pozytywnie lub negatywnie wpływać na cechy użytkowe wytwarzanych elementów. Z uwagi na rozwój narzędzi i metod obróbki ubytkowej (HSM – high speed machining), często obróbka skrawaniem jest ostatnią operacją w procesie kształtowania finalnego wyrobu, traktowaną jako proces wykończeniowy z pominięciem szlifowania. Zrozumienie procesu generowania naprężeń podczas obróbki skrawaniem jest ważnym aspektem związanym z dokładnością wymiarowo-kształtową. Źródłami naprężeń w obróbce skrawaniem mogą być odkształcenia plastyczne w warstwie skrawanej, spowodowane występowaniem trwałych przemieszczeń w sieci krystalicznej, zmiany objętości materiału z powodu gradientów temperatury, czy przemiany fazowe. W obróbce skrawaniem zjawiska te mogą występować jednocześnie jednak z różną intensywnością i to one wpływają na końcowy stan naprężeń. Odkształcenia plastyczne powstają podczas formowania się wiórów w strefie kontaktu narzędzia z przedmiotem obrabianym. Gradienty temperatury powstają w wyniku tarcia wewnętrznego podczas odkształcenia plastycznego, a także tarcia przedmiotu o powierzchnie robocze narzędzia. Jeśli temperatura i naciski w strefie skrawania są wystarczająco wysokie może dochodzić do przemian fazowych w warstwie obrobionej. Z uwagi na złożoność procesu, modelowanie naprężeń własnych w warstwie wierzchniej jest skomplikowanym zagadnieniem.

Z reguły wpływ ciepła związany jest z generowaniem rozciągających naprężeń, natomiast oddziaływanie powierzchni przyłożenia narzędzia na przedmiot obrabiany ma charakter nagniatający [6].

Niska przewodność cieplna sprzyja generowaniu wysokiej temperatury w technologicznej warstwie wierzchniej. To z kolei przekłada się na występowanie

naprężeń rozciągających [7]. Podobny charakter naprężeń może powstać podczas skrawania stopów tytanu, co niekorzystnie przekłada się na wytrzymałość w procesie eksploatacji.

Obecnie modelowanie numeryczne metodą MES może służyć nie tylko do prognozowania sił i rozkładu temperatury w procesie skrawania, ale także do wyznaczania rozkładu naprężeń własnych, jednak zgodność symulacji z rzeczywistym eksperymentem wymaga zastosowania odpowiedniego modelu [7]. W pracy [15] przedstawiono wyniki badań analizy MES symulacji 2D i 3D rozkładu naprężeń własnych w warstwie wierzchniej obrabianych części. Wykorzystano model Johnsona-Cooka. Zastosowano typowe parametry skrawania, stosując w analizie rzeczywisty model płytki skrawającej, uwzględniając złożony kształt powierzchni natarcia. Wyniki uzyskane z symulacji porównano z wynikami pomiaru rzeczywistych naprężeń własnych, występujących w warstwie wierzchniej, mierzonych metodą rentgenowską. Zaobserwowano znaczny wpływ posuwu i nieznaczny wpływ głębokości skrawania na wartości naprężeń własnych.

Naprężenia własne są jedną z przyczyn zmian kształtu części lotniczych podczas obróbki skrawaniem na maszynach CNC. Typowymi metodami redukcji naprężeń własnych są wyzarzanie odprężające lub sezonowanie. Mogą też być stosowane metody wibracyjne. Jednak w przypadku wielkogabarytowych części stosowanych w przemyśle lotniczym koszty takiej obróbki są duże. Odształcenia elementów cienkościennych spowodowane są naprężeniami wywołanymi przez siły skrawania. Jednym ze sposobów zmniejszenia sił jest obróbka HSM, której definicja zakłada spadek sił skrawania wraz ze wzrostem prędkości skrawania powyżej pewnej granicy. Ponadto obecne systemy CAM pozwalają na optymalizację ścieżek narzędzia (np. obróbka ze stałym kątem opasania). Bardzo ważnym zagadnieniem jest sposób mocowania elementów, zwłaszcza dużych elementów cienkościennych, w przyrządach (tzw. ramkach), które zwiększają powierzchnie mocowania podczas obróbki, a w konsekwencji zmniejszają naciski jednostkowe [3, 4].

Kontrola naprężeń własnych kształtowanych podczas obróbki cienkościennych elementów, wykonanych ze stopów lekkich stosowanych w przemyśle lotniczym, jest szczególnie istotna. Spotyka się bowiem sytuacje, w których wielkogabarytowe elementy po zdjęciu z obrabiarki ulegają znacznym odkształceniom. Odształcenia te mogą być efektem wprowadzonych naprężeń własnych podczas obróbki skrawaniem oraz naprężeniami wprowadzonymi w czasie wytwarzania półfabrykatów. Podczas obróbki skrawaniem następuje zdejmowanie kolejnych warstw materiału, co powoduje zaburzenie stanu równowagi i skutkuje pojawiającymi się odkształceniami obrabianego elementu. Relaksacja naprężeń własnych niekiedy przyczynia się do powstawania odkształceń uniemożliwiających wykonanie operacji montażowych. Próby „spasowania” elementów, odkształconych w nieprzewidziany sposób, mogą skutkować znacznymi naprężeniami montażowymi. Proces frezowania jest skomplikowany i wiele czynników powoduje ingerencję w stan warstwy wierzchniej.

Próby opracowania modeli opisujących naprężenia własne często uwzględniają siły skrawania, temperaturę procesu oraz zużycie narzędzi. Istotny jest wpływ starcia na powierzchni przyłożenia VB. Nieznaczące zużycie ostrza generuje niewielkie naprężenia szczątkowe. Zwiększenie się wartości parametru zużycia ostrza VB wpływa na rozwój naprężeń rozciągających. Frezowanie przy granicznych wartościach zużycia ostrza skutkuje też większymi rozrzutami wartości naprężeń [23].

W wielu przypadkach po obróbce skrawaniem powstają naprężenia własne rozciągające. Istnieją rozwiązania konstrukcyjne narzędzi, które podczas obróbki skrawaniem generują korzystne naprężenia ściskające. Narzędzia takie posiadają ostrza skrawające rozmieszczone na obwodzie, jak w przypadku klasycznych frezów. Natomiast w centralnej części znajduje się element w kształcie wycinka czaszy kuli o promieniu zaokrąglenia $R = 3$ mm, który wykonuje pracę nagniatania, jak w przypadku typowych narzędzi nagniatających. Różnica odległości pomiędzy ostrzami skrawającymi a elementem nagniatającym (naddatek na nagniatanie) wynosi 0,1 mm. Wówczas, podczas jednoczesnego procesu skrawania i nagniatania takim narzędziem w warstwie wierzchniej zalegają ściskające naprężenia rzędu (100-200) MPa w strefach przypowierzchniowych oraz (300-400) MPa w odległości 0,05 mm od powierzchni obrobionej. Jest to efekt zbliżony do uzyskiwanego w procesie obróbki nagniataniem [25].

Poszukiwanie korzystnych parametrów technologicznych obróbki, z punktu widzenia minimalizacji występujących naprężeń własnych, jest szczególnie istotne podczas frezowania cienkościennych elementów typowych dla przemysłu lotniczego, motoryzacyjnego lub precyzyjnego, dla których naprężenia generowane podczas obróbki powodują znaczne odkształcenia obrabianych części. Przy elementach cienkościennych istotne jest minimalizowanie występowania naprężeń zarówno rozciągających jak i ściskających w celu minimalizacji efektu odkształceń po obróbce. Zmniejszenie głębokości skrawania z zakresu typowego dla obróbki zgrubnej do zakresu stosowanego obróbce wykończeniowej wpływa na zmniejszenie naprężeń własnych. Podczas frezowania pełną szerokością frezu trzpieniowego mogą pojawić się rozciągające naprężenia własne w środkowym obszarze skrawania (bliżej osi narzędzia), natomiast naprężenia ściskające mogą występować w zewnętrznym strefach (bliżej krawędzi narzędzia) [5].

Do prognozowania naprężeń własnych po obróbce frezowaniem wykorzystuje się modele matematyczne, których poprawność potwierdza zgodność z wynikami eksperymentalnymi. Analizowane czynniki wpływające na naprężenia własne to prędkość skrawania, posuw, promień zaokrąglenia naroża oraz zużycie powierzchni przyłożenia. Zaobserwowano, że podczas obróbki na sucho stopów aluminium generowane są naprężenia rozciągające. Dla małych prędkości skrawania wzrost posuwu na ostrze prowadzi do wzrostu wartości rozciągających naprężeń własnych. Ponadto wykazano, że czynnikiem, w przypadku obróbki stopu aluminium, wpływającym na naprężenia własne, jest obciążenie termiczne występujące podczas skrawania [12].

13.3. Naprężenia własne w przedmiotach obrabianych nagniataniem i szcztkowaniem

Jednym z głównych celów obróbki nagniataniem, obok obróbki gładkościowej i wymiarowo-kształtowej, jest obróbka polegająca na wytworzeniu określonych zmian własności fizycznych materiału w warstwie wierzchniej, powodujących uodpornienie go na działanie takich czynników eksploatacyjnych jak: zmęczenie, zużycie ściernie, korozja itp. Kluczową rolę w podniesieniu wytrzymałości zmęczeniowej oraz odporności na działanie korozji odgrywają takie czynniki, jak umocnienie materiału i naprężenia własne. Cechą charakterystyczną większości metod obróbki nagniataniem jest generowanie ściskających naprężeń własnych. Wyjątkiem może być nagniatanie elektromechaniczne przy wykorzystaniu dużych prądów. Główną przyczyną powstawania naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej po obróbce nagniataniem są przede wszystkim odkształcenia plastyczne, a następnie wysoka temperatura i przemiany strukturalne.

Występowanie ściskających naprężeń własnych tłumaczy się dążeniem warstwy odkształconej do zwiększenia powierzchni, czemu przeciwdziałają głębiej położone warstwy materiału. W efekcie w warstwach znajdujących się głębiej (w rdzeniu) powstają równoważące naprężenia rozciągające, a w warstwie wierzchniej występują naprężenia ściskające. Wskaźnikami opisującymi stan naprężeń jest głębokość zalegania, wartość bezwzględna maksymalnych naprężeń oraz rozkład. Często krzywa rozkładu dla naprężeń ściskających może mieć punkt przegięcia, leżący w pewnej odległości od powierzchni nagniatanej, szczególnie w przypadku stosowania dużych sił nagniatania. Może to być spowodowane występowaniem wysokiej temperatury nagniatania (zwłaszcza w sposobach ślizgowych) lub wystąpieniem nieciągłości i mikropęknięć, co może objawiać się również łuszczeniem powierzchni. Do czynników wpływających na wartości naprężeń w procesie nagniatania zalicza się parametry technologiczne obróbki nagniataniem oraz własności materiału. Dla popularnych sposobów nagniatania naporowego tocznego parametrami wpływającymi na naprężenia własne są naciski jednostkowe, których wzrost powoduje zwiększenie wartości bezwzględnej maksymalnych naprężeń oraz głębokości ich zalegania. Z kolei zwiększenie posuwu nagniatania wpływa na zmniejszenie wartości naprężeń własnych. Natomiast zwiększenie średnicy elementu nagniatającego powoduje zmniejszenie głębokości zalegania naprężeń gdyż wzrasta powierzchnia styku z przedmiotem obrabianym.

Z reguły głębokości zalegania naprężeń generowanych przez obróbkę nagniataniem sięgają 0,2-1 mm. Jednak znane są przypadki w technologii nagniatania dużych przedmiotów w przemyśle ciężkim, przy stosowaniu sił krążkowania rzędu (30-50) kN, że naprężenia sięgają głębokości nawet do 20 mm [16].

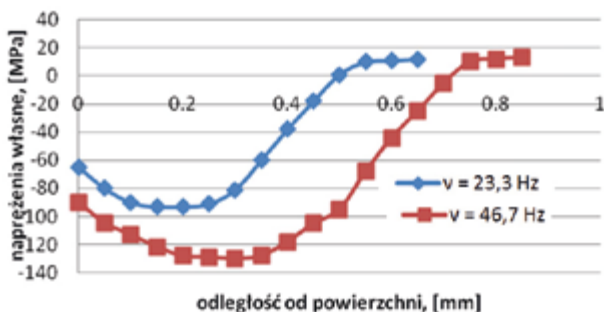
Istnieje możliwość modelowania rozkładu naprężeń własnych przy użyciu sztucznych sieci neuronowych. W przypadku przedmiotów obrabianych nagnia-

tającym przepychaniem ślizgowym dla wcisku względnego równego 2% uzyskuje się największą głębokość zalegania naprężeń. Ponadto opracowany przy użyciu sieci neuronowych model rozkładu naprężeń własnych może być wykorzystany do rozbudowy układu sterującego procesem nagniatającego przepychania ślizgowego [13].

Jedną z metod nagniatania dynamicznego rozproszonego jest nagniatanie wibracyjne, które polega na umieszczeniu obrabianych przedmiotów w komorze roboczej, częściowo wypełnionej luźnymi elementami nagniatającymi (najczęściej kulkami), a następnie wprawieniu tej komory w ruch wibracyjny.

Wyniki badań doświadczalnych wpływu nagniatania wibracyjnego przy użyciu swobodnych kulek na rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotów ze stopu aluminium AW2024 wskazują, że takie parametry jak amplituda drgań wibratora, częstotliwość drgań wibratora, średnica kulek nagniatających, czas nagniatania wpływają na głębokość zalegania, wartości naprężeń oraz ich rozkład. W całym zakresie zmian badanych parametrów w wyniku nagniatania wibracyjnego występuje ukształtowanie ściskających naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. Wraz ze wzrostem wartości wszystkich parametrów nagniatania następuje wzrost głębokości „zalegania” ściskających naprężeń własnych, natomiast wartość naprężeń zmniejsza się ze wzrostem średnicy kulek nagniatających, a ze wzrostem pozostałych parametrów zwiększa się [28].

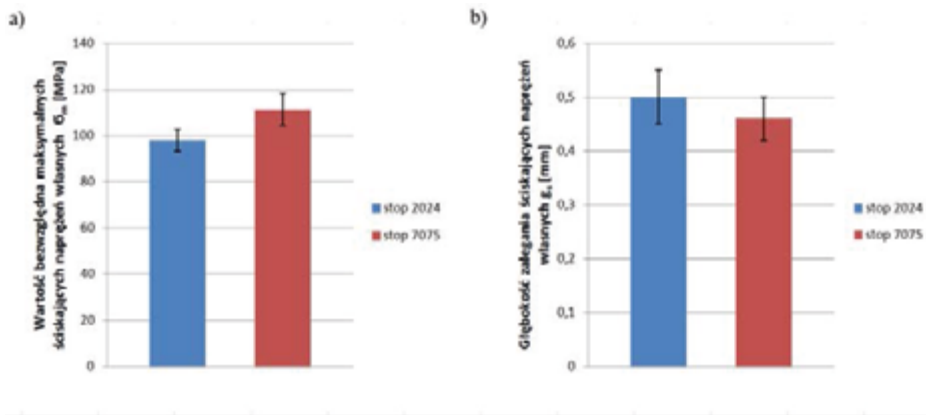
W pracy [26] przedstawiono gruntowną analizę właściwości warstwy wierzchniej elementów metalowych w procesie dynamicznego nagniatania rozproszonego. Na rysunku 13.3 przedstawiono typowy rozkład naprężeń własnych w próbce stopu aluminium po nagniataniu wibracyjnym.



Rys. 13.3. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni po nagniataniu wibracyjnym stopu aluminium AW2024 dla różnych częstotliwości nagniatania v (amplituda drgań wibratora $a = 14$ mm, średnica kulek $D_k = 6$ mm, czas nagniatania $t = 10$ min [27])

Energia kinetyczna wibrujących elementów nagniatających w kształcie kulek zamieniana jest na energię uderzenia, powodując efekt odkształcenia plastycznego w warstwie wierzchniej. Ważną zaletą tego procesu jest możliwość łatwej obróbki

przedmiotów o złożonym kształcie, a cechą charakterystyczną generowanie naprężeń ściskających korzystnie wpływających na wytrzymałość zmęczeniową obrobionych elementów. Na rysunku 14.4 przedstawiono porównanie wartości bezwzględnej maksymalnych naprężeń ściskających oraz głębokości zalegania dla stopów aluminium AW2024 oraz AW7075. Widoczna jest nieco większa wartość i mniejsza głębokość występowania ściskających naprężeń własnych dla stopu 7075, co można tłumaczyć większą twardością i wytrzymałością tego stopu [27].



Rys. 13.4. Porównanie wartości bezwzględnej maksymalnych ściskających naprężeń własnych σ_m (a) oraz głębokości „zalegania” ściskających naprężeń własnych g_s (b) dla stopów aluminium AW2024 i AW7075 po nagniataniu wibracyjnym ($a = 14$ mm, $v = 23,3$ Hz, $Dk = 6$ mm, $t = 10$ min)

Do prognozowania rozkładu naprężeń własnych w przypadku kulowania wykorzystuje się metodę elementów skończonych. W sprzężeniu pomiędzy kontaktującymi się elementami nagniatającymi z powierzchnią obrabianą stosuje się algorytm kary (ang. penalty contact algorithm), z założonym współczynnikiem tarcia. Przy użyciu oprogramowania Abaqus/Explicit możliwa jest ocena wpływu liczby uderzeń kulek w losowych miejscach na powierzchni przedmiotu obrabianego (intensywności kulowania), czasu kontaktu i chropowatości powierzchni na naprężenia własne w przypadku nagniatania stopu aluminium AW7075 [19].

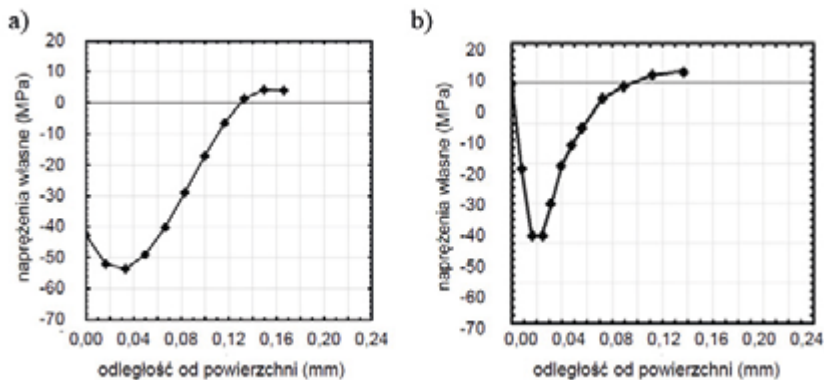
Ściskające naprężenia własne będące efektem nagniatania dynamicznego rozproszonego przekłada się bezpośrednio na wytrzymałość zmęczeniową. W przypadku stopu magnezu AZ80 przy doborze optymalnych parametrów możliwy jest wzrost wytrzymałości zmęczeniowej o 60%. Zbyt duża intensywność kulowania wpływa na obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej [29].

Obróbka szczotkowaniem, która wykorzystywana jest do oczyszczania powierzchni, usuwania produktów korozji, powłok lakierowych, czy też usuwania zadziorów, także może przyczynić się do generowania naprężeń własnych w warstwie wierzchniej.

Z racji charakteru obróbki końce włókien uderzają w obrabianą powierzchnię wykonując pracę nagniatania. Oprócz parametrów technologicznych obróbki szczotkowaniem, takich jak prędkość obwodowa, prędkość posuwu oraz dosuw, wpływających na fizyczne właściwości warstwy wierzchniej, w tym naprężenia własne, zaliczyć należy także cechy charakterystyczne związane z narzędziem szczotkującym. Do cech tych należy rodzaj włókna, średnica pojedynczego włókna, gęstość upakowania włókien, średnica narzędzia. Wraz ze wzrostem średnicy szczotki wzrasta też długość włókien stosowanych na wypełnienia szczotki, przez co szczotka jest bardziej elastyczna. Zwiększenie średnicy pojedynczego włókna wpływa na zwiększenie sztywności włókna. Jednak ze wzrostem średnicy włókien zmniejsza się całkowita liczba włókien rozmieszczonych na obwodzie szczotki (tzw. gęstość upakowania).

Ponadto, podczas obróbki szczotkowaniem występuje efekt wzrostu temperatury, szczególnie, gdy proces prowadzony jest bez wykorzystania cieczy chłodzącej, co także może przyczynić się do złożonego charakteru oddziaływania obróbki szczotkowaniem na stan naprężeń własnych.

Podczas obróbki szczotkowaniem, oprócz efektu nagniatania, występuje też efekt usuwania materiału [14]. Dlatego wpływ na częściowe usunięcie zmienionej poprzez obróbkę szczotkowaniem warstwy ma też kierunek przesuwu narzędzia, gdyż obróbka może być realizowana w sposób współbieżny lub przeciwbieżny [22].



Rys. 13.5. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni po szczotkowaniu: a) stopu aluminium AW7075, b) stopu magnezu AZ31

Typowy rozkład naprężeń własnych po obróbce szczotkowaniem stopu aluminium AW7075 oraz stopu magnezu AZ31 przedstawiono na rys. 13.5. Jako narzędzie zastosowano szczotkę walcową o średnicy 120 mm wykonaną z drutu stalowego o średnicy 0,2 mm. Widoczna jest mniejsza bezwzględna wartość maksymalnych naprężeń ściskających, a także mniejsza głębokość zalegania tych naprężeń dla stopu magnezu AZ31. Jednak dla obu stopów wystąpił korzystny ściskający rozkład naprężeń w strefach przypowierzchniowych.

Literatura

1. Adamski M., *Naprężenia własne. Przykłady pomiarów ultradźwiękowych*, Wyd. Biuro Gamma, Warszawa 1999.
2. Adamski M., Deputat J., *Ultradźwiękowe pomiary naprężeń własnych w blachach*, *Mechanik*, 4, 1983, s. 215.
3. Adamski W., *Analiza przyczyn zmiany kształtu części lotniczych podczas obróbki skrawaniem na maszynach CNC i skuteczne przeciwdziałanie tym zjawiskom*, *Mechanik*, 1, 2012, s. 80-81.
4. Adamski W., *Wybrane kierunki zwiększania wydajności procesów skrawania*, *Mechanik*, 5-6, 2009, s. 687-704.
5. Beizhi Li B., Jiang X., Yang J., Liang S., *Effects of depth of cut on the redistribution of residual stress and distortion during the milling of thin-walled part*, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 216, 2015, s. 223-233.
6. Grzesik W., *Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych*, WNT, Warszawa 2010.
7. Grzesik W., *Wykorzystanie modelowania numerycznego i techniki VR do doskonalenia procesów technologicznych części silnie obciążanych cieplnie i mechanicznie*, *Mechanik*, 10, 2012, s.803-817.
8. Henriksen, E.K., *Residual Stresses in Machined Surfaces*. American Society of Mechanical Engineers -Transactions, 73(1), 1951, s. 69-76.
9. Jachimowicz M., *Metody pomiaru naprężeń szczątkowych*. *Przegląd Mechaniczny*, 7-8, 2004, s. 56.
10. Jakimowicz J., Szymczyk E., Sławiński G., *Analiza wpływu technologii nitowania na stan przemieszczeń, odkształceń i naprężeń wokół nitu*, *Mechanik*, 4, 2008, s. 332-337.
11. Janowski S., Szyrle W., *Pomiary naprężeń własnych po obróbce cieplnej*, *Przegląd Mechaniczny*, 10, 1981, s. 11.
12. Kuang-Hua F., Chih-Fu W., *A residual – stress model for the milling of aluminum alloy (2014-T6)*, *Journal of Materials Processing Technology*, 51, 1995 s.87-105.
13. Lipski J., Zaleski K., *Modelowanie rozkładu naprężeń własnych w przedmiotach obrabianych nagniatającym przepychaniem ślizgowym*, *Eksploatacja i Niezawodność*, 4, 2004, s. 18-21.
14. Matuszak J., Zaleski K., *Wpływ parametrów technologicznych szczotkowania stali S235JR na chropowatość powierzchni obrobionej oraz masę usuniętego materiału*, [W:] Świć A. (red.), *Zastosowania informatyki w inżynierii produkcji*, Wyd. LTN, 2009, s. 69-81.
15. Niesłony P., Grzesik W., Laskowski P., Sienawski J., *Numerical and Experimental Analysis of Residual Stresses Generated in the Machining of Ti6Al4V Titanium Alloy*, *Procedia CIRP*, Volume 13, 2014, s. 78-83.

16. Przybylski W., *Technologia obróbki nagniataniem*, WNT, Warszawa 1987.
17. Rossini N. S., Dassisti M., Benyounis K. Y., Olabi A. G., *Methods of measuring residual stresses in components*, Materials & Design, 35, 2012, s. 572-588.
18. Senczyk D., *Naprężenia własne. Wstęp do generowania, sterowania i wykorzystania*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1996.
19. Sheng X., Xia Q., Cheng X., Lin L., *Residual stress field induced by shot peening based on random-shots for 7075 aluminum alloy*, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 22, Supplement 2, 2012, s. 261-267
20. Skrzypek S., *Makronaprężenia własne cienkich warstw – pomiar metodą $\sin 2\psi$ w nowej geometrii dyfrakcji przy stałym kącie padania (SKP)*, Inżynieria powierzchni, 2, 2001, s. 47.
21. Skrzypek S., Karp J., Chruściel K., *Automatyczny pomiar makronaprężeń własnych*, Przegląd Mechaniczny, 20, 1989, s.13.
22. Stango R.J., *Filamentary brushing tools for surface finishing applications*, Metal Finishing, Volume 100, Supplement 1, 2002, s. 82-91.
23. Tang Z.T., Z.Q. Liu Y.Z. Pan, Y. Wan, and X. Ai, *The influence of tool flank wear on residual stresses induced by milling aluminum alloy*, Journal of Materials Processing Technology, 209(9), 2009, s. 4502-4508.
24. Tonidov M. T., *Residual stresses at the surface of automotive suspension springs*, Journal of Materials Science, 35, 2000, s.3313 – 3320.
25. Toshiaki S., Sasahara H., Tsutsumi M., *Development of a new tool to generate compressive residual stress within a machined surface*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 44, Issue 11, 2004, s. 1215-1221.
26. Zaleski K., *Kształtowanie wybranych właściwości warstwy wierzchniej elementów metalowych w procesie dynamicznego nagniatania rozproszonego*, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2008.
27. Zaleski K., Matuszak J.: *Badania rozkładu naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotów ze stopów aluminium po nagniataniu wibracyjnym*, Mechanik, 11, 2014, s. 935/331-339.
28. Zaleski K., Matuszak J.: *Wpływ parametrów nagniatania wibracyjnego na rozkład naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotów ze stopu aluminium*, [W:] Przybylski W. (red.), *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie*, T.4, 2014, s. 246-257
29. Zhang P., Lindemann J., *Influence of shot peening on high cycle fatigue properties of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80*, Scripta Materialia, vol. 52, iss.6, 2005, s. 485-490

14. Obróbka krawędzi w konstrukcjach wykonanych ze stopów aluminium i magnezu

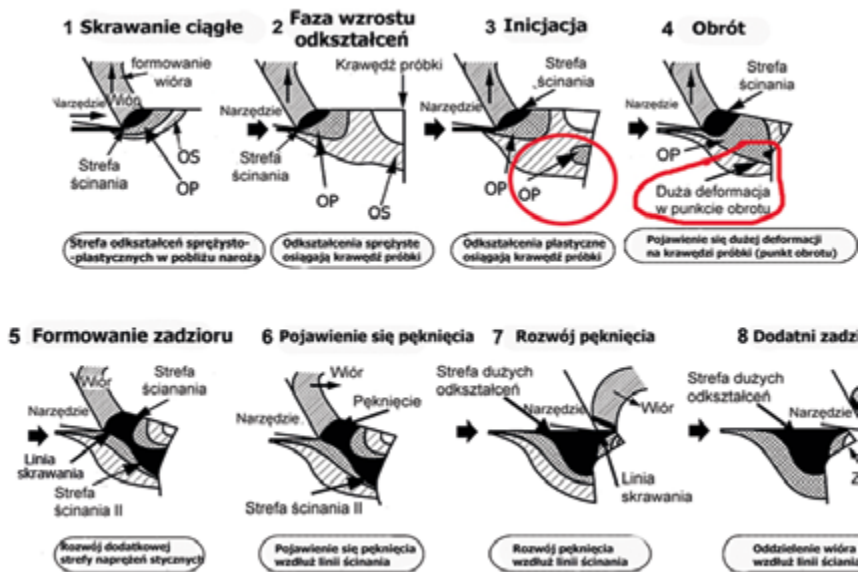
W obróbce skrawaniem formowanie się zadziorów jest zjawiskiem nieuniknionym. W przemyśle lotniczym niemal 100% części po obróbce skrawaniem poddawane jest procesowi usuwania zadziorów. W momencie oddzielania warstwy skrawanej i przekształcaniu jej w wiór występuje szereg zjawisk, takich jak odkształcenia sprężyste, plastyczne, tarcie, wydzielanie się ciepła itp. W strefie kontaktu narzędzia skrawającego z przedmiotem obrabianym występują silne odkształcenia plastyczne, będące fundamentem procesu formowania się zadziorów.

14.1. Formowanie zadziorów w obróbce skrawaniem

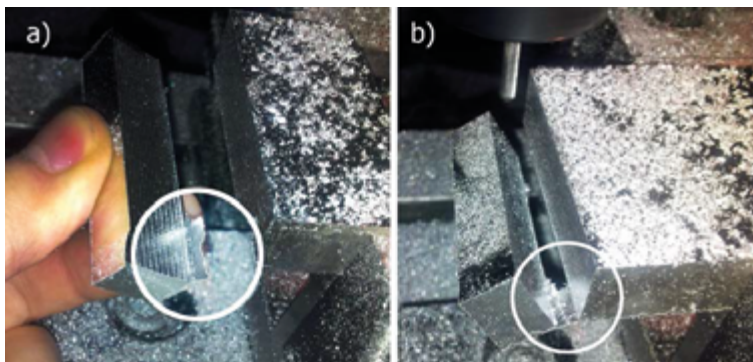
Obszar krawędzi przedmiotów obrabianych jest tym miejscem, w którym narzędzie wchodzi bądź wychodzi z materiału (w zależności od odmiany obróbki: współbieżna/przeciwbieżna). Obszar ten zawsze narażony jest na odkształcenia plastyczne, powodujące formowanie się zadziorów, szczególnie w chwili, w której krawędź skrawająca narzędzia zbliża się do krawędzi obrabianego materiału (rys. 14.1). Kluczowym momentem w procesie formowania się zadzioru jest inicjacja, w której następuje pojawienie się odkształceń plastycznych poniżej linii wyznaczającej kierunek ruchu narzędzia. W miarę jak narzędzie zbliża się do krawędzi przedmiotu obrabianego, w miejscu tym rozpoczyna się silna deformacja, stanowiąca punkt obrotu materiału. Ta część materiału, która jest odcinana przez krawędź skrawającą stanowi wiór, natomiast część, która zostaje przytwierdzona do materiału rodzimego, traktowana jest jako zadziór.

Obecnie spotkać można wiele definicji i klasyfikacji typów zadziorów w zależności od procesu wytwarzania, kształtu, mechanizmu formowania, rodzaju obróbki. Jedną z pierwszych klasyfikacji [12], bazującą na mechanizmie formowania się zadziorów, dzieliła je na cztery grupy. Zadziór Poisson'a (ang. Poisson burr) powstaje na skutek bocznego spęczania materiału wzdłuż obrabianej krawędzi, wywołanego naprężeniami ściskającymi generowanymi przez narzędzie skrawające. Zadziór zwinięty (ang. roll-over burr), jest w gruncie rzeczy nieodciętym przez narzędzie wiórem w momencie wyjścia tego narzędzia ze strefy skrawania.

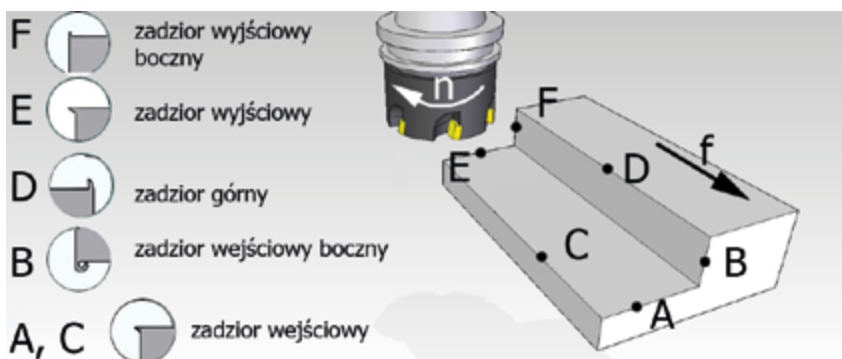
Kolejnym rodzajem jest zadziór powstały na skutek rozerwania materiału (ang. tear burr). Zadziór ten najczęściej tworzy się w przypadku operacji wykrawania i jest rezultatem deformacji materiału na granicy wykrojnik – matryca. Podobnie jak zadziór zwinięty, powstaje na krawędzi obrabianego przedmiotu, w miejscu wyjścia narzędzia. Ostatni rodzaj zadzioru (ang. cut-off burr) definiowany jest jako fragment materiału pozostający po procesie oddzielania przedmiotu obrabianego od półfabrykatu. Zjawisko to najczęściej ma miejsce podczas cięcia pilą lub frezem palcowym (rys. 14.2) a także obserwowane jest w osi przedmiotów odcinanych podczas toczenia.



Rys. 14.1. Ośmioetapowy schemat formowania zadziuru [14]

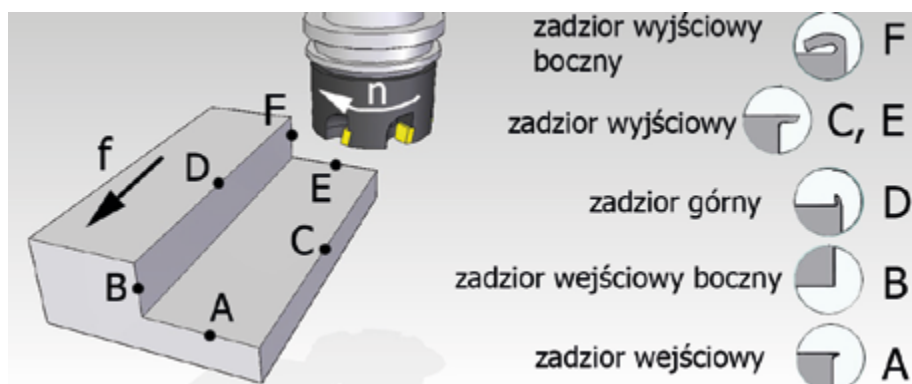


Rys. 14.2 Zadziór typu „cut off” zaobserwowany podczas frezowania: a) widok zadziuru, b) końcowa faza separacji próbki



Rys. 14.3. Typy zadziorów powstających podczas frezowania współbieżnego (opis w tekście)

Obróbka frezowaniem jest najczęściej stosowanym sposobem obróbki ubytkowej, nie tylko w przemyśle lotniczym, ale także w wielu innych gałęziach przemysłu, z uwagi na różnorodność odmian, narzędzi i możliwości kinematycznych nowoczesnych obrabiarek. Podczas frezowania na każdej z nowo utworzonych krawędzi, może pojawić się zadziór. W zależności od miejsca występowania i rodzaju obróbki zadziory te przyjmują różne kształty. Podczas frezowania współbieżnego zadziór wejściowy pojawia się na przecięciu płaszczyzny wejściowej i płaszczyzny obrobionej (rys. 14.3 oznaczenie A, C). Z racji charakteru pracy narzędzia, w miejscu tym ostrze wchodzi do strefy skrawania, a ścinany materiał w przeważającej części przekształcany jest w wiór, natomiast zadziory charakteryzują się niewielkimi wielkościami. W zależności od osiowej głębokości skrawania różny jest udział powierzchni walcowej frezu czołowego w procesie usuwania materiału. Na powierzchni przejściowej przedmiotu obrabianego, znajdującej się pomiędzy powierzchnią obrabianą a obrobioną, pojawiają się przy wejściu i wyjściu zadziory boczne (rys. 14.3 oznaczenie B, F). Natomiast na powierzchni obrabianej pojawiają się zadziory górne (oznaczenie D).



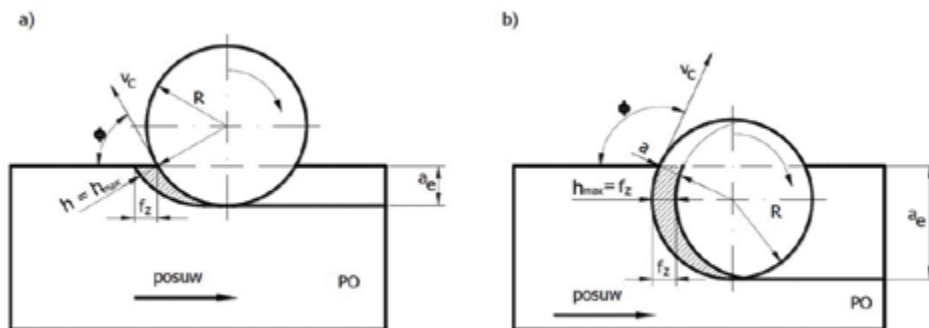
Rys. 14.4. Typy zadziorów powstających podczas frezowania przeciwbieżnego (opis w tekście)

Przy frezowaniu przeciwbieźnym największymi wartościami cechuje się zadziór wyjściowy (rys. 14.4 oznaczenie C, E). W tym przypadku powstawanie zadzioru może być tłumaczone występowaniem dwóch różnych zjawisk. Pierwsze – to odgięty plastycznie materiał poniżej powierzchni obrabianej na skutek działania ostrza narzędzia, które wychodzi ze strefy skrawania. Drugie zjawisko – to materiał pochodzący od wiórów tworzonych w obrębie wyjścia, które nie zostały usunięte (odcięte przez ostrza skrawające). O wysokości zadziorów w przypadku obu tych zjawisk w dużej mierze decyduje rodzaj materiału obrabianego.

Do istotnych czynników wpływających na powstawanie zadziorów podczas frezowania zalicza się: odmiana obróbki (współbieżna, przeciwbieżna), prędkość skrawania, posuw, zużycie narzędzia, promieniowa głębokość skrawania a_e podczas frezowania czołowego i uzależniony od niej kąt wyjścia Φ . Kąt ten, zawarty między wektorem prędkości skrawania v_c , a krawędzią przedmiotu w miejscu wyjścia narzędzia ze strefy skrawania, można wyznaczyć z zależności:

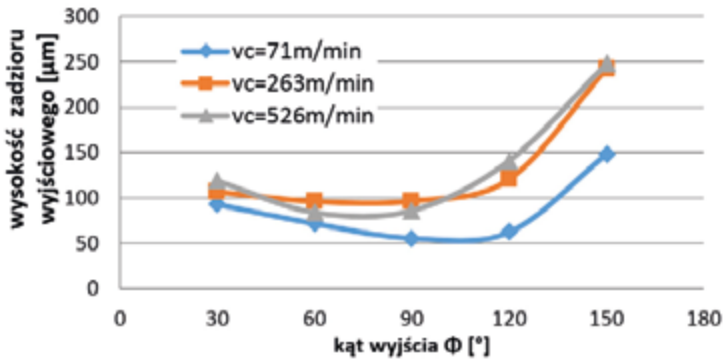
$$\Phi = \cos^{-1} \left(\frac{R - a_e}{R} \right)$$

Na rysunku 14.5 przedstawiono graficzną prezentację kąta wyjścia Φ . Jeżeli promieniowa głębokość skrawania a_e jest mniejsza od promienia narzędzia R wtedy przy wyjściu grubość warstwy skrawanej osiąga maksimum $h = h_{\max}$.



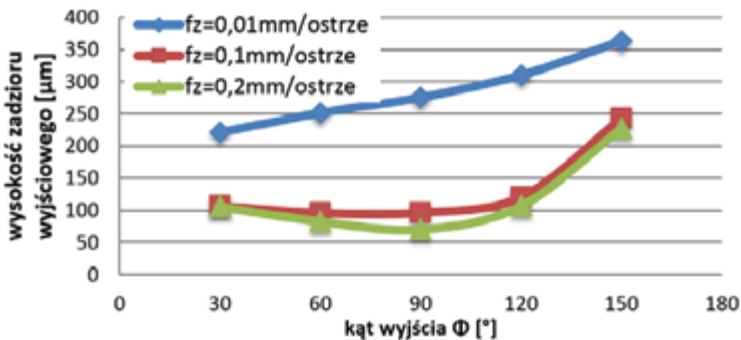
Rys. 14.5. Kąt wyjścia

Na rysunku 14.6 przedstawiono wpływ kąta wyjścia Φ na wysokość zadzioru podczas frezowania stopu AZ91HP dla zmiennych prędkości skrawania v_c . Przy małej prędkości skrawania $v_c = 71$ m/min zaobserwowano mniejszą średnią wysokość zadziorów w całym zakresie, przyjętych w badaniach, wartości kątów wyjścia Φ . Z kolei dla wszystkich prędkości skrawania przy dużym kącie wyjścia $\Phi = 150^\circ$, co odpowiada wartości $a_e = 23,33$ mm, zaobserwowano znaczący wzrost średniej wysokości zadziorów.



Rys. 14.6. Wpływ kąta wyjścia Φ na wysokość zadzioru wyjściowego dla różnych prędkości skrawania v_c [22]

Wykres na rysunku 14.7 przedstawia wpływ kąta wyjścia Φ na wysokość zadzioru podczas frezowania stopu magnezu AZ91HP dla zmiennych wartości posuwu na ostrze f_z . Przy obróbce z posuwem $f_z = 0,01$ mm/ostrze uzyskano zadziory o znacznie większej wysokości od około 100 μm do 200 μm w porównaniu z obróbką z większymi posuwami. Dla posuwu $f_z = 0,01$ mm/ostrze wraz ze wzrostem kąta wyjścia Φ wzrasta wysokość zadzioru. W badaniach nie zaobserwowano znaczących różnic w wysokości zadzioru, porównując obróbkę z posuwem $f_z = 0,1$ oraz 0,2 mm/ostrze.



Rys. 14.7. Wpływ kąta wyjścia Φ na wysokość zadzioru wyjściowego dla różnych wartości posuwu na ostrze [22]

Z powyższego wynika, że należy unikać dużych kątów wyjścia narzędzia ze strefy skrawania $\Phi > 120^\circ$, oraz skrajnie małych posuwów, przy których występuje zaburzony proces oddzielania warstwy skrawanej [22].

Trendy rozwojowe obróbki frezowaniem na pierwszy plan wysuwają skrawanie z dużymi prędkościami (HSC – ang. High Speed Cutting) oraz skrawanie wyso-

kowydajne (HPC – ang. High Performance Cutting) [1, 27]. Jest to szczególnie zauważalne w przemyśle lotniczym, gdzie uzyskanie pożądanego kształtu określonego elementu często związane jest z usunięciem ponad 90% materiału z półfabrykatu. Obróbka HSC jest często ostatnim procesem (w odróżnieniu od HPC) kształtowania gotowego wyrobu. Po tej operacji, przedmioty będące elementami składowymi większych konstrukcji, podlegają procesom montażowym. Dlatego istotny jest stan krawędzi przedmiotów niepowodujący problemów na tym etapie. Każdy rodzaj zadziorów należy traktować indywidualnie. Inne są warunki formowania się zadzioru wyjściowego a inne zadzioru górnego [27].

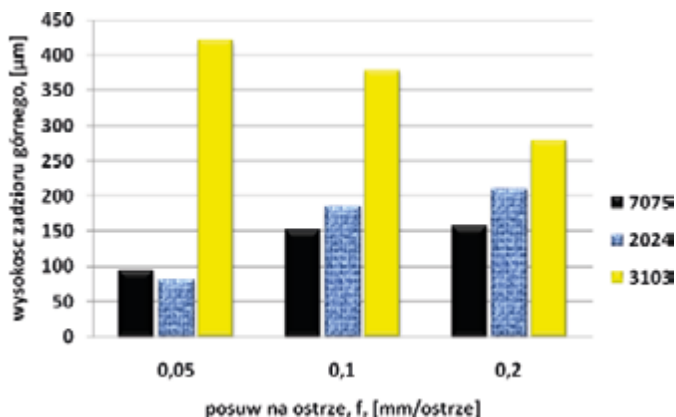
W celu oceny wpływu rodzaju materiału na proces tworzenia się zadziorów przeprowadzono badania przy użyciu próbek z trzech różniących się pod względem właściwości stopów aluminium. Skład chemiczny i właściwości fizyczne stopów AW7075, AW2024 oraz AW3103 zestawiono w tabeli 14.1.

Tabela 14.1. Skład chemiczny i właściwości fizyczne badanych stopów aluminium

gatunek materiału	skład chemiczny								
	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Si	Fe	Ti	Al
7075	1,4-1,5	0,07	2,4	0,20	5,6-5,7	0,08	0,16	0,06	reszta
2024	4,3	0,51	1,4	0,01	0,02	0,04	0,11	0,05	reszta
3103	0,1	1,0-1,5	-	-	0,2	0,6	0,7	0,2	reszta
gatunek materiału	właściwości fizyczne								
	Rm [MPa]			Rp0,2 [MPa]			HB		
7075	583			526			152		
2024	436			311			120		
3103	140-180			100-130			65		

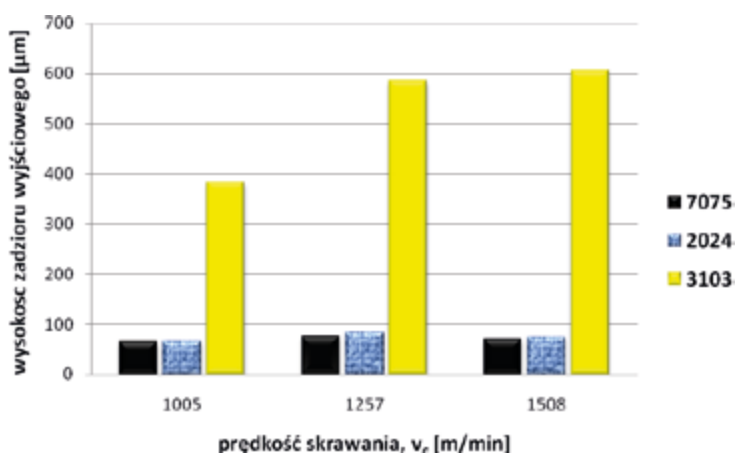
Badania przeprowadzono przy różnych prędkościach skrawania v_c oraz przy różnych wartościach posuwu na ostrze f_z . Głębokość skrawania utrzymano na stałym poziomie. Istotnym czynnikiem z punktu widzenia tworzenia się zadziorów jest kąt wyjścia narzędzia ze strefy skrawania uzależniony od szerokości skrawania. Kąt ten utrzymano na stałym poziomie, a wpływ jego omówiono w przypadku badań stopu magnezu AZ91HP [22]. Jako narzędzie został użyty frez składany dwuostrzowy o średnicy 20 mm firmy Iscar.

Spośród różnych rodzajów zadziorów, jakie mogą pojawić się podczas frezowania czołowego, dokonano pomiaru wysokości dwóch charakterystycznych, które przybierają stosunkowo największe wartości i występują najczęściej, są to: zadziór górny i zadziór wyjściowy.



Rys. 14.8. Wpływ posuwu na ostrze na wysokość zadzioru górnego [21]

Na rysunku 14.8 zaprezentowano wykres wpływu posuwu na ostrze na wysokość zadzioru górnego. Dla materiałów AW7075 i AW2024, wzrost posuwu f_z prowadzi do wzrostu wysokości zadziorów górnych. Odwrotnie jest dla miękkiego materiału o niskiej granicy plastyczności, jakim jest stop AW3103. Przy skrawaniu tego stopu przy małym posuwie uzyskano najwyższe zadziory, a wzrost posuwu prowadzi do zmniejszenia wysokości zadzioru górnego, jednak minimalna wartość wysokości zadzioru dla materiału AW3103, uzyskana przy posuwie 0,2 mm/ostrze, przewyższa wartości jakie uzyskano dla twardszych materiałów, jakimi są stopy AW7075 i AW2024. Spowodowane jest to tym, że dla miękkiego i plastycznego materiału, jakim jest stop AW3103, większy posuw zapewniał lepszą separację materiału przez krawędzie skrawające narzędzia.



Rys. 14.9. Wpływ prędkości skrawania na wysokość zadzioru wyjściowego [21]

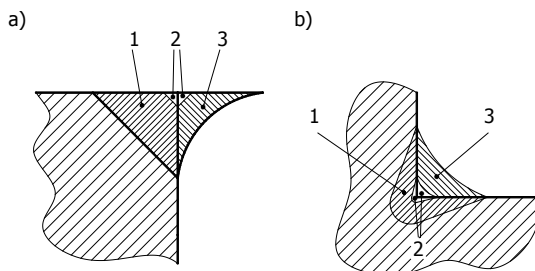
Analizując wpływ prędkości skrawania na wysokość zadzioru wyjściowego, nie zaobserwowano znaczących zmian wysokości zadziorów dla materiałów AW7075 i AW2024. Natomiast dla stopu AW3103 widoczna jest tendencja wzrostowa spowodowana wzrostem prędkości odkształcenia plastycznego przy wyjściu narzędzia ze strefy skrawania (rys. 14.9).

O ile jakość powierzchni uzyskana po obróbce szybkościowej (HSC), traktowanej często jako obróbka wykończeniowa jest zadowalająca, to stan krawędzi nakazuje stwierdzić, że wymagają one obróbki polegającej na usunięciu zadziorów.

14.2. Stan krawędzi przedmiotów

W zakładach produkcyjnych często określany jest wymagany stan krawędzi po obróbce, definiujący dopuszczalny przedział wartości zaokrąglenia bądź sfazowania krawędzi. Punktem odniesienia może być norma ISO13715 opisująca stany krawędzi i sposób ich oznaczania na rysunkach technicznych [37].

Norma ISO 13715 definiuje stan krawędzi jako geometryczny kształt i wymiar krawędzi. Zgodnie z normą istnieją trzy stany występujące zarówno na zewnętrznych jak i wewnętrznych krawędziach przedmiotów (rys. 14.10). Na krawędzi zewnętrznej przedmiotów może pojawić się zadzior 3 (ang. burr).



Rys. 14.10. Stany występujące na krawędziach: a) zewnętrznych, b) wewnętrznych [37]

W wyniku procesu fazowania, czy też usuwania zadziorów otrzymać można podcięcie 1 (ang. undercut) lub obszar ostrej krawędzi 2 (ang. sharp edge). Trzy stany krawędzi wewnętrznej to podcięcie 1, obszar ostrej krawędzi 2 oraz odejście 3 (ang. passing).

Oprócz rodzaju podcięcia istotny jest także jego wymiar oznaczany literą „a” (rys. 14.11). W celu pełnej identyfikacji stanu krawędzi, poza wymiarem, istotne są jeszcze dwie kwestie. Pierwsza z nich to znak. Jeśli jest dodatni „+”, to dopuszczalne jest istnienie zadzioru, natomiast znak „-” dopuszcza podcięcie. Drugą kwestią to umiejscowienie wartości liczbowej wraz ze znakiem, przy ogólnym symbolu dotyczącym stanu krawędzi, podczas oznaczania na rysunku technicznym, co jednoznacznie określa kierunek dopuszczalnego zadzioru lub podcięcia. Zagadnienie to przedstawia tabela 14.2.

Wymiar	Oznaczenie
a	Krawędź z dopuszczalnym zadziorem, podcięcie niedozwolone
+ 2,5	
+ 1	
+ 0,5	
+ 0,3	
+ 0,1	
+ 0,05	Ostra krawędź
+ 0,02	
0,02	
0,05	Krawędź z dopuszczalnym podcięciem, zadziór niedozwolony
- 0,1	
- 0,3	
- 0,5	
- 1	
- 2,5	
a	
a – dodatkowy wymiar	

Rys. 14.11. Wartości odchyłki od nominalnej krawędzi

Tabela 14.2. Przykładowe oznaczenia na rysunku technicznym i ich interpretacja [6]

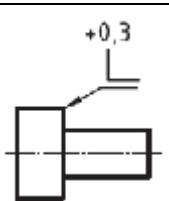

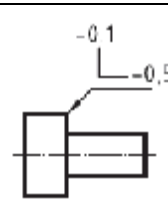

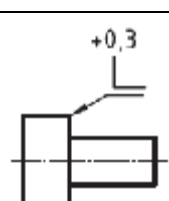

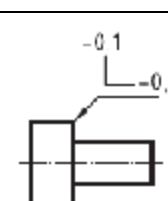

przykład 1		przykład 2	
			

Tabela 14.3. Przykładowe oznaczenia na rysunku technicznym i ich interpretacja [6]

przykład 1		przykład 2	
			

Przy pewnym granicznym wymiarze „a” uzyskuje się stan ostrej krawędzi. Wymiar ten jest kwestią umowną uzależnioną od klasy wykonania wyrobu czy też ustaleń na linii dostawca – klient (rys. 14.11).

14.3. Przegląd metod usuwania zadziorów

Istnieje wiele metod usuwania zadziorów. Do najczęściej stosowanych można zaliczyć gratowanie ręczne, szlifowanie, frezowanie frezami pilnikowymi. Spotyka się także usuwanie zadziorów z przedmiotów umieszczonych w medium ściernym. Zalicza się do nich obróbkę rotacyjno – ścierną, przetłoczno – ścierną, magneto – ścierną czy też strumieniowo – ścierną. Z uwagi na stopień zautomatyzowania, proces usuwania zadziorów można podzielić na ręczny, ręczno – maszynowy i maszynowy [2, 7, 8].

Usuwanie zadziorów w sposób ręczny znajduje zastosowanie głównie w produkcji jednostkowej. Jednak w pewnych sytuacjach, np. w przypadku przedmiotów o dużych gabarytach i skomplikowanym kształcie wytwarzanych w przemyśle lotniczym, stosuje się także w produkcji seryjnej. Mimo stosunkowo tanich narzędzi obróbka ręczna jest kosztownym procesem, na który składają się koszty stanowisk ślusarskich, koszty związane z wydzieleniem powierzchni w hali produkcyjnej oraz zaangażowanie personelu. Ręczna obróbka nie zawsze jest procesem powtarzalnym, bazuje głównie na doświadczeniu pracowników wykonujących operacje usuwania zadziorów na stanowiskach ślusarskich.

Obróbka ręczno – maszynowa przy użyciu szlifierek taśmowych lub narzędzi szybkoobrotowych stanowi bardziej wydajny proces w stosunku do obróbki ręcznej. Obróbka krawędzi na szlifierekach taśmowych stosowana jest w przypadku przedmiotów o niewielkich gabarytach, przy produkcji jednostkowej. Natomiast obróbka za pomocą narzędzi szybkoobrotowych stosowana jest w przypadku przedmiotów o większych gabarytach, gdzie często łatwiej jest wykonywać precyzyjne ruchy szlifiereką ręczną wzdłuż obrabianych krawędzi przedmiotów. Tego typu obróbka stosowana jest zarówno w produkcji jednostkowej, jak również w przypadku obróbki seryjnej. Część roboczą szybkoobrotowych narzędzi mogą stanowić ściernice, frezy pilnikowe, szczotki trzpieniowe itp. Obróbce ręczno – maszynowej krawędzi na szlifierekach niekiedy towarzyszą silne drgania. Długotrwałe narażenie pracowników na działanie drgań może przyczynić się do zespołu chorób wibracyjnych.

Uwzględniając aspekt ekonomiczny najbardziej pożądana jest obróbka zautomatyzowana. Szeroko stosowaną grupę metod zautomatyzowanych stanowią metody, w których pracę wygładzania krawędzi i usuwania zadziorów pełni medium ściernie. Jedną z najczęściej stosowanych metod jest obróbka wibrościerna. Przedmioty poddane obróbce wibrościerniej umieszcza się w specjalnych wygładzarkach wibracyjnych wraz z materiałem ściernym w postaci kształtek ściernych lub polerskich. Urządzenie wykonuje ruchy wibracyjne o zadanej częstotliwości i amplitudzie. Problemem obróbki wibrościerniej są odpady poszlifierskie, których tempo powstawania jest duże. Specyfika procesu obróbki wibrościerniej powoduje, że intensywny proces ścierny zachodzi nie tylko na granicy medium ściernie – przedmiot obrabiany, ale głównie pomiędzy kształtkami ściernymi czy polerskimi.

Kształtki te stopniowo zmniejszają swoje wymiary do osiągnięcia wymiarów granicznych, po uzyskaniu których są wymieniane na nowe. W przypadku dużych elementów liczba przedmiotów mogących jednocześnie zmieścić się do miski pojemnika jest ograniczona. Wiele części wytwarzanych w przemyśle lotniczym (wreگی, wsporniki) osiąga wymiary, dla których obróbka metodą wibrościerną jest nieekonomiczna lub w ogóle nie jest możliwa [5, 6, 13, 29, 32].

Inną metodą obróbki krawędzi jest metoda przetłoczno – ścierna, która polega na przetłaczaniu pasty ścierniej względem trudnodostępnych powierzchni lub krawędzi obrabianych. Obróbka ta może odbywać się w cyklu jedno- lub dwukierunkowym. Pasta ścierna przepływa pod ciśnieniem przez otwory w przedmiocie obrabianym. Na efektywność procesu wpływają właściwości past ściernych, które składają się z osnowy (np. lepkosprężystego polimeru) oraz ziaren ściernych. Ziarna ściernie wykonywane są z węglików krzemu, węglików boru, tlenku glinu czy diamentu. Ważnymi parametrami past jest ich lepkość oraz nieadhezyjność. Poza parametrami związanymi z pastami istotny, z punktu widzenia skuteczności metody, jest stopień skomplikowania geometrycznego przedmiotu i materiał, z którego jest wykonany. Urządzenia do realizacji tego procesu są każdorazowo dostosowywane do konkretnego zadania technicznego. Wymagane parametry związane z przedmiotem obrabianym (chropowatość powierzchni, stępienie krawędzi) są zależne od rodzaju pasty ścierniej, ciśnienia wywieranego przez tłok, prędkości przepływu pasty oraz czasu obróbki [10, 11, 34].

Kolejną metodą wykorzystującą medium ściernie do wykonania pracy usuwania zadziorów, jest obróbka magneto – ścierna. Obróbka polega na wzajemnym ruchu między medium ściernym a przedmiotem obrabianym. Istnieją dwie odmiany tej obróbki. Pierwszy sposób polega na tym, że medium ściernie o właściwościach magnetycznych znajduje się w stałym polu magnetycznym, natomiast przedmiot obrabiany może wykonywać ruch obrotowy, posuwisto – zwrotny lub najczęściej kombinację tych dwóch ruchów. Drugi sposób polega na tym, że przedmiot obrabiany jest nieruchomy natomiast ziarna ściernie są „napędzane” przez wirujące pole magnetyczne. Ziarna ściernie omiatając przedmiot obrabiany usuwają zadziory, wprowadzając dodatkowy efekt polerowania. Obróbka ta charakteryzuje się niewielkimi siłami, stąd ubytek materiału jest niewielki, nie przekracza z reguły kilkunastu mikrometrów. Istnieje kilka wad obróbki magnetościerniej. Cechą charakterystyczną obróbki są małe siły. Jednak istnieją sytuacje, w których stan krawędzi przedmiotów wymaga zintensyfikowania procesu w obrębie krawędzi obciążonej zadziorami. W przeciwnym razie czas do usunięcia zadziorów jest długi. Zwiększenie sił podczas obróbki magnetościerniej wymaga stosowania oprzyrządowania o znacznych gabarytach i masie [3, 17, 31, 32].

Zadziory mogą być usuwane poprzez obróbkę chemiczną, która polega na zanurzeniu przedmiotów w kąpielach trawiących. Przedmioty mocowane są indywidualnie – pojedynczo lub partiami na stojakach, w koszach lub bębnach.

Wadami tej obróbki jest wielostopniowy proces mycia i suszenia przedmiotów po procesie obróbczym, jednak największym problemem jest zagrożenie dla środowiska i bezpieczeństwo pracowników będących w kontakcie z odczynnikami chemicznymi [16].

Bardziej wydajnym sposobem w stosunku do obróbki chemicznej jest obróbka elektrochemiczna. Jest to proces, w którym wykorzystuje się dodatkowo energię elektryczną do procesu roztwarzania elektrochemicznego materiału obrabianego, który przebiega zgodnie z prawami Faradaya. Obróbka z reguły przebiega bez bezpośredniego kontaktu narzędzia, jakim jest elektroda robocza, z przedmiotem obrabianym oraz bez działania pola wysokich temperatur, co jest istotne w przypadkach, kiedy niepożądana jest zmiana właściwości warstwy wierzchniej po obróbce. Pole elektryczne koncentruje się w obrębie krawędzi obarczonych zadziorami, co przyspiesza proces ich usuwania. Do wad obróbki elektrochemicznej zalicza się energochłonność procesu oraz koszt urządzeń i oprzyrządowania do filtrowania elektrolitu, a także wielostopniowego procesu mycia i suszenia. Czynniki te sprawiają, że metoda ta jest opłacalna głównie w przypadku obróbki seryjnej. Problemem jest także usuwanie zadziorów charakteryzujących się dużą wielkością. W takich przypadkach istnieje konieczność wydłużenia czasu obróbki w celu skutecznego usunięcia zadziorów. Dłuższy czas oddziaływania obróbki elektrochemicznej na pozostałe powierzchnie i prawidłowo ukształtowane krawędzie przedmiotu może powodować nadmierne roztworzenie materiału i niepożądany ubytek materiału [4, 9, 30].

Uzyskanie wymaganego stanu krawędzi może być również prowadzone poprzez obróbkę elektroerozyjną. Cechą charakterystyczną stosowania obróbki elektroerozyjnej, w porównaniu z obróbką elektrochemiczną, jest miejscowa intensyfikacja procesu, co nie powoduje usuwania materiału w miejscach gdzie nie jest to pożądane. Obróbka ta znajduje zastosowanie w elektronice, w przypadku urządzeń stosowanych w medycynie, podczas obróbki miniaturowych elementów obarczonych zadziorami, co w dobie miniaturyzacji stanowi o perspektywiczności tej metody [15].

Kolejną metodą obróbki krawędzi jest obróbka termiczna. W odróżnieniu od innych metod, w których oprócz obróbki krawędzi, ważnym a niekiedy podstawowym celem jest wygładzenie powierzchni, jedynym zadaniem obróbki termicznej (związanej z obróbką krawędzi) jest usunięcie niepożądanych zadziorów. Obróbka termiczna, jak wskazuje nazwa, jest to proces, w którym wykorzystywana jest energia cieplna do usunięcia zadziorów. Ponieważ zadziory często mają charakter nieregularny, w niektórych miejscach przyjmują duże rozmiary. W przypadku zadziorów charakteryzujących się dużą podstawą (silnym przytwierdzeniem do materiału) obróbka termiczna powoduje w tych miejscach stopienie materiału, który w formie małych cząstek utwierdzony jest do przedmiotu w obrębie krawędzi. W takich przypadkach potrzebna jest dodatkowa operacja. Istnieje też

problem w przypadku materiałów charakteryzującym się dużym współczynnikiem przewodzenia ciepła, ponieważ są przypadki, w których ciepło szybko odbierane jest przez materiał, powodując nieskuteczne usunięcie zadziorów (przy zbyt małej energii) lub nadmierne nadtopienie krawędzi (przy zbyt dużej energii). Do materiałów o dużym współczynniku przewodzenia ciepła zaliczają się stopy aluminium, co może powodować ograniczenie stosowania obróbki termicznej do tej grupy materiałów. Jeśli chodzi o stopy magnezu, jednym z podstawowych problemów związanych z obróbką jest zagrożenie związane z samozapłonem magnezu. Temperatura zapłonu stopów magnezu to ok. 480°C, temperatura spalania powyżej 2000°C. Właściwości te uniemożliwiają zastosowanie obróbki termicznej w przypadku tych stopów [27].

Istnieje też wiele możliwości usuwania zadziorów poprzez typowe odmiany obróbki skrawaniem, jak np. frezowanie. Producenci narzędzi prześcigają się w rozwiązaniach tego typu narzędzi, które poza kształtami różnią się także geometrią w zależności od obrabianego materiału. Frezy takie mogą być mocowane na centrach obróbkowych lub w ręcznych narzędziach szybkoobrotowych.

Większość sposobów usuwania zadziorów poprzez typowe metody obróbki skrawaniem polega na oddziaływaniu sztywnego narzędzia na przedmiot obrabiany i wykonaniu sfazowania. Istnieje jednak ewentualność, że nowo powstałe krawędzie w wyniku fazowania sztywnymi narzędziami będą ostre lub obarczone „mikrozadziorami”, co podczas wykonywania precyzyjnych elementów może być niepożądane.

Stopień komplikacji procesu usuwania zadziorów zwiększa się, gdy pojawiają się one na dużych elementach o krawędziach krzywoliniowych lub krawędziach nie leżących w jednej płaszczyźnie. Takie przypadki często spotyka się w przemyśle lotniczym (np. konstrukcje kieszeniowe, uźebrowane), a usunięcie zadziorów z takich konstrukcji możliwe jest dzięki zastosowaniu narzędzi, których włókna robocze są elastyczne i dopasowują się do krzywizny krawędzi podlegającej obróbce.

14.4. Obróbka szczotkowaniem jako metoda usuwania zadziorów i kształtowania krawędzi

Zautomatyzowana metoda usuwania zadziorów poprzez obróbkę szczotkowaniem na typowych obrabiarkach CNC, może spowodować częściowe wyeliminowanie drogich (metody wibrościerne, strumieniowo-ścierne) oraz szkodliwych dla środowiska (metody chemiczne, elektrochemiczne, termiczne) technologii usuwania zadziorów obecnie stosowanych w przemyśle.

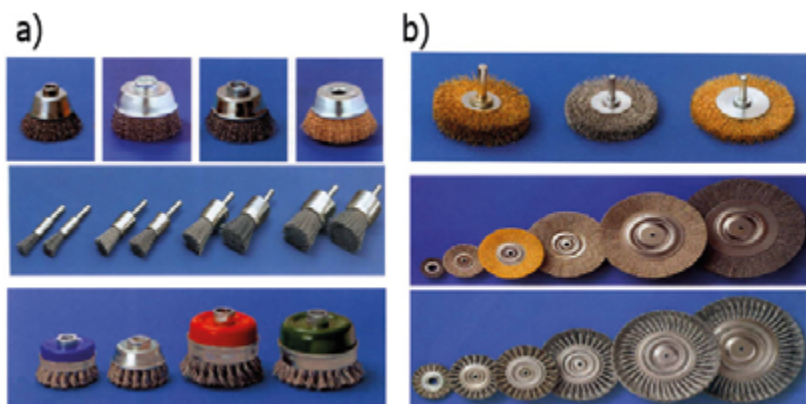
Zastosowanie elastycznych szczotek walcowych na obrabiarkach sterowanych numerycznie pozwala w sposób automatyczny przeprowadzić obróbkę usuwania zadziorów z dużych elementów poprzez planowanie ścieżki narzędzia wzdłuż kra-

wędzi przedmiotów. Na kartach technologicznych często obróbka frezowaniem, prowadzona na centrach obróbkowych, stanowi przedostatni etap kształtowania wyrobu. Ostatnią operacją jest obróbka wykończeniowa krawędzi. Wykorzystując fakt zamocowania przedmiotu na obrabiarce, można przy wykorzystaniu szczotek trzpieniowych znajdujących się w magazynie narzędziowym przeprowadzić proces usuwania zadziorów. W odróżnieniu od narzędzi sztywnych, z racji elastyczności włókien stosowanych na wypełnienia szczotek, uzyskuje się większe bezpieczeństwo obróbki. Wszelkie błędy operatora obrabiarki, bądź błędy programu NC spowodowane aproksymacją ścieżek przez postprocesor programu CAM, powodujące niezamierzony kierunek ruchu narzędzia, w niektórych przypadkach spowodują jedynie ugięcie elastycznych włókien narzędzia szczotkującego bez szkody dla szczotki, obrabiarki, czy też finalnego wyrobu. W przypadku obróbki szczotkowaniem problemem może być prawidłowy dobór narzędzi do konkretnego materiału w celu uzyskania wymaganego stanu krawędzi czy też efektów obróbki. Na rynku istnieje wiele odmian konstrukcyjnych szczotek oraz materiałów stosowanych na włókna narzędzi. Przykładowe rodzaje włókien przedstawiono na rys. 14.12.

Symbol	Miękkie	Symbol	Średniotwarde	Symbol	Twarde
M1	Drut ze stali bessemeowskiej falisty Ø 0,06 - 0,25 mm	S1	drut stalowy o twardości naturalnej, falisty Ø 0,06-0,80 mm	T1	drut stalowy, hartowany, twardy i ciągliwy, falisty Ø 0,20-0,50mm
M2	drut z fosforobrazu (CuSn), gładki lub falisty Ø 0,05 - 0,5 mm	S2	drut stalowy, hartowany, gładki Ø 0,30-1,20	T2	drut stalowy mosiądzowany, sprężysty, ciągliwy, pleciony, falisty Ø 0,15-0,38mm
M3	drut mosiężny (CuZn) gładki lub falisty Ø 0,06 - 0,56 mm	S3	drut stalowy, nierdzewny i kwasoodporny, gładki lub falisty Ø 0,30-1,00 mm	T3	drut stalowy mosiądzowany, pojedynczy, sprężysty, falisty Ø 0,15-0,38mm
M4	drut z mosiądzu wysokoniklowego (CuNi), falisty Ø 0,06 - 0,25 mm	S4	drut specjalny, odporny na korozję, odporny na opary powstające w procesach produkcyjnych do temp. 650°C, gładki lub falisty Ø0,3-0,50mm	T4	drut stalowy, hartowany, twardy i ciągliwy, gładki Ø 0,35-0,80mm
		S5	drut specjalny odporny na temperatury do 1350°C, falisty Ø 0,3-0,50mm	T5	drut płaski, hartowany, gładki 1,1x0,25 do 3,3x0,75 mm

Rys. 14.12. Rodzaje wypełnień stosowanych na włókna szczotek [38]

Szczotki można podzielić na czołowe i walcowe (rys. 14.13). W przypadku bardziej „agresywnych” zastosowań stosuje się szczotki z drutem splecionym.



Rys. 14.13. Podział szczotek: a) czołowe, b) walcowe




Dodatkowo, w obrębie jednego materiału, zmiana średnicy pojedynczego włókna lub jego długości diametralnie wpływają na sztywność narzędzia i efekty obróbki. Ponadto zmienne parametry technologiczne obróbki dają szeroką paletę możliwości oddziaływania obróbki szczotkowaniem na przedmiot obrabiany oraz na krawędzie obarczone niepożądanymi zadziorami [18].

Narzędzia do szczotkowania, są stosowane w procesach obróbki powierzchni między innymi do usuwania zadziorów, zaokrąglenia krawędzi, nadawania połysku, oraz w szeroko pojętym procesie oczyszczania powierzchni. Dodatkowo obróbka szczotkowaniem może służyć do wytworzenia określonej kierunkowości struktury geometrycznej powierzchni dającej efekt dekoracyjny, poprzedza proces łączenia, czy też służy do wygenerowania określonych właściwości warstwy wierzchniej.

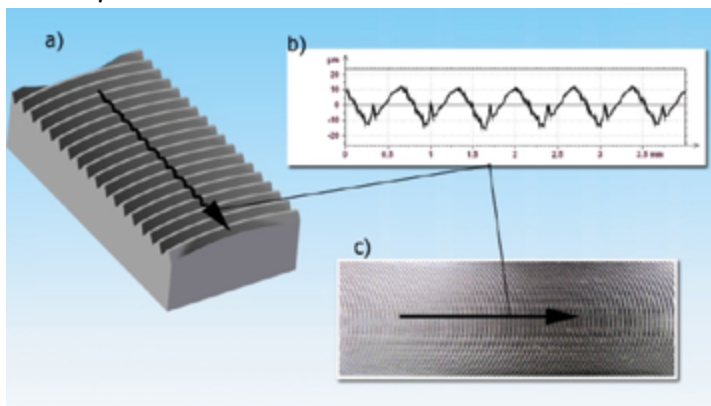
14.5. Obróbka krawędzi metodą szczotkowania w konstrukcjach wykonanych ze stopów aluminium i magnezu

Proces usuwania zadziorów, musi wiązać się także z utrzymaniem wymaganych właściwości warstwy wierzchniej, do których zalicza się między innymi właściwości stereometryczne. Chropowatość powierzchni w obrębie krawędzi po usuwaniu zadziorów metodą szczotkowania powinna być nie gorsza niż uzyskana po obróbce poprzedzającej szczotkowanie lub na tym samym poziomie. Dlatego też, obróbka krawędzi metodą szczotkowania powinna być analizowana wielokierunkowo. W tabeli 14.3 przedstawiono narzędzia zastosowane w eksperymencie. Szczotki różnią się rodzajem wypełnienia, a także średnicą pojedynczego włókna. Szczotkowanie przeprowadzono na sucho oraz z zastosowaniem cieczy Ometa Extramet 575. Zastosowano tradycyjny, zewnętrzny sposób chłodzenia.

Tabela 14.4. Charakterystyka narzędzi wykorzystanych w badaniach [20]

szczotki	oznaczenie	T1	T2	T3
	widok			
średnica narzędzia	120 mm	120 mm	120 mm	
materiał włókna	mosiądz	stal	stal	
średnica włókna	0,2 mm	0,2 mm	0,3 mm	

Dla trzech typów szczotek badania przeprowadzono przy zmiennych parametrach szczotkowania. Wartości parametrów podano w tabeli 14.4. Wartość maksymalnej prędkości skrawania $v_c = 1266$ m/min stosowana w badaniach jest równa granicznej maksymalnej wartości prędkości obrotowej sugerowanej przez producenta dla tego typu szczotki. Po procesie szczotkowania mierzono chropowatość powierzchni w kierunku prostopadłym do śladów po operacji frezowania, jak pokazano na rysunku 14.14.

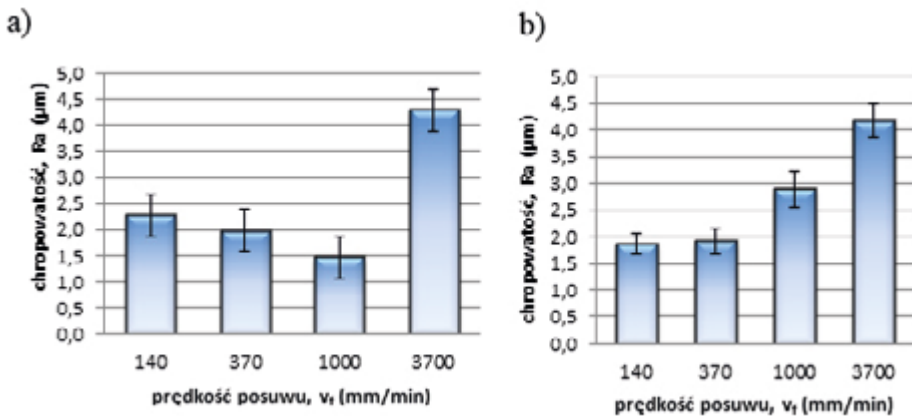


Rys. 14.14. Kierunek pomiaru chropowatości: a) schemat próbki, b) przykładowy profil, c) rzeczywisty widok próbki po frezowaniu [19]

Średnia wartość chropowatości powierzchni po frezowaniu wyniosła $R_a = 4,75$ μm dla stopu aluminium EN AW 7075 z odchyleniem standardowym $\sigma = 0,34$ μm .

Dla obu szczotek stalowych, które charakteryzują się większą sztywnością, w porównaniu ze szczotką z drutu mosiężnego, zaobserwowano podobny wpływ szczotkowania na chropowatość powierzchni. Na rysunku 14.15 przedstawiono wykres obrazujący wpływ posuwu na chropowatość powierzchni po obróbce szczotkowaniem narzędziem T3. Minimalną wartość chropowatości dla obróbki na sucho uzyskano dla posuwu $v_f = 1000$ m/min. To oznacza, że po lewej stronie wykresu od punktu

minimum chropowatości ($v_f = 1000$ m/min) odkształcenia plastyczne są zbyt wysokie, natomiast po prawej stronie od punktu minimum, szczotka nie jest w stanie wygładzić powierzchni ze względu na krótki czas kontaktu z obrabianym przedmiotem. Zjawisko to jest najlepiej widoczne na profilogramach widocznych w tabeli 14.6. Zastosowanie chłodzenia powoduje przesunięcie punktu minimum w kierunku mniejszych prędkości ruchu posuwowego jak pokazano na rysunku 14.15b. To może być bardzo przydatne w operacjach wymagających dłuższego kontaktu szczotki z przedmiotem obrabianym bez pogorszenia chropowatości powierzchni. Podczas obróbki szczotkowaniem temperatura wpływająca na odkształcenia plastyczne odgrywa kluczową rolę w procesie kształtowania chropowatości powierzchni po obróbce szczotkowaniem. Analizując wpływ parametrów technologicznych szczotkowania można stwierdzić, że istnieje optymalna wartość parametrów szczotkowania, przy której następuje znaczna poprawa chropowatości. Zbyt ostre parametry mogą powodować pogorszenie chropowatości, natomiast zbyt słabe brak poprawy chropowatości.

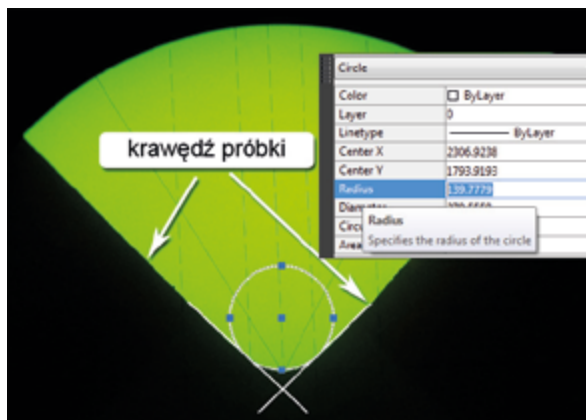


Rys. 14.15. Wpływ prędkości posuwu na chropowatość powierzchni dla szczotki T3: a) obróbka na sucho, b) obróbka z chłodzeniem [19]

Tabela 14.5. Parametry szczotkowania [19]

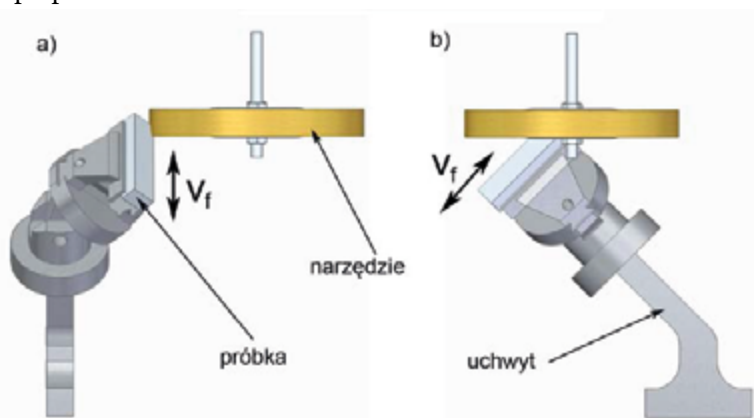
Lp.	prędkość posuwu, v_f	prędkość szczotkowania, v_c	dosuw, a
	mm/min	m/min	mm
1	370	422	3
2		844	
3		1266	
4		1689	
5	140	1266	
6	370		
7	1000		
8	3700		

Usuwanie zadziorów wiąże się ze zmianą stanu krawędzi. W celu odwzorowania zarysu krawędzi po obróbce szczotkowaniem wykorzystano metodę replik przy wykorzystaniu dwuskładnikowej masy Plastiform LK-AD. Polimeryzacja tego typu masy rozpoczyna się po wymieszaniu dwóch składników. Charakteryzuje się formowaniem z zachowaniem wysokiej dokładności szczegółów i wiernych replik. Przekroje replik badano pod mikroskopem. Przykładowa replika pokazana jest na rysunku 14.16.



Rys. 14.16. Widok repliki

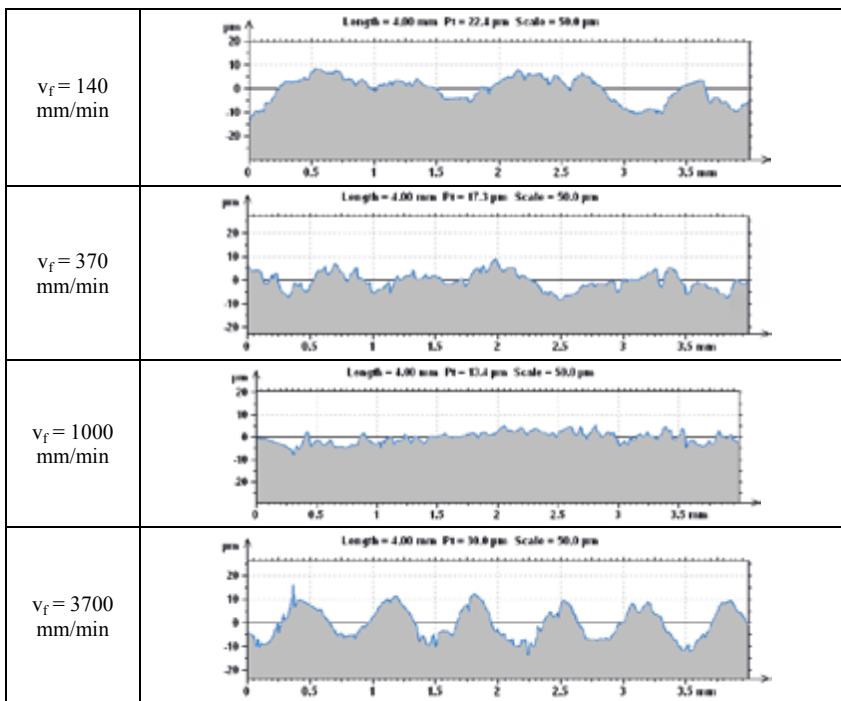
Próbki do usuwania zadziorów mocowano w specjalnym uchwycie przedstawionym na rysunku 14.17 tak, aby wektor prędkości obwodowej skierowany był pod kątem 45° w stosunku do obrabianej krawędzi. Dla każdej próbki realizowano dwa przejścia. Pierwsze na prawych obrotach wrzeczona oraz, drugie powrotne, na lewych obrotach. Pozwoliło to na uzyskanie stałości promienia zaokrąglenia krawędzi po procesie usuwania zadziorów.



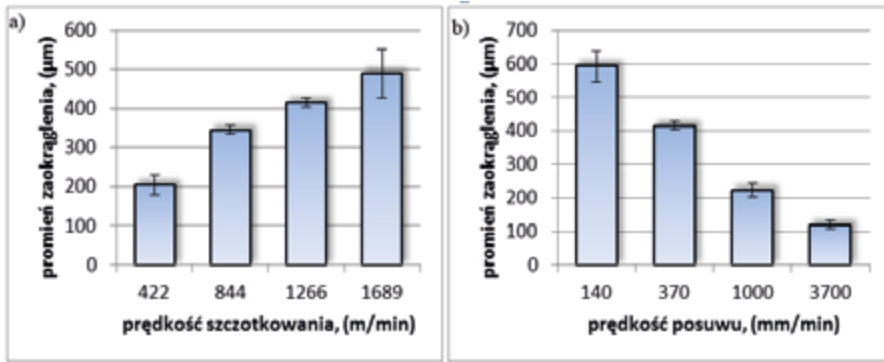
Rys. 14.17. Schemat stanowiska i kinematyka procesu usuwania zadziorów: a) widok z przodu, b) widok z boku

Proces frezowania, pomimo zastosowania zalecanych przez producentów parametrów skrawania oraz strategii obróbkowej, spowodował pojawienie się zadziorów na krawędziach próbek. Średnia wartość wysokości zadziorów dla stopu AZ91HP wyniosła 43 μm . W tabeli 14.6 przedstawiono przykładowe przekroje replik obrazujące zaokrąglenie krawędzi po szczotkowaniu narzędziem T2 i odpowiadające im zdjęcia rzeczywistych krawędzi po obróbce. Narzędzie T1 zapewniło skuteczny proces usuwania zadziorów jedynie w przypadku dużych prędkości skrawania oraz małych prędkości posuwu (długi czas kontaktu szczotki z obrabianym przedmiotem).

Tabela 14.6.



Szczotki T2 i T3 zapewniły efektywne usuwanie zadziorów w całym zakresie stosowanych parametrów technologicznych. Jeśli prędkość szczotkowania rośnie, promień zaokrąglenia krawędzi także wzrasta. Ze spadkiem prędkości posuwu rośnie promień zaokrąglenia, co jest spowodowane wydłużonym czasem kontaktu szczotki ze szczotkowaną krawędzią. Przykładowe wartości promieni zaokrąglenia po szczotkowaniu dla szczotki T2 przedstawiono na rysunku 14.18. Promień zmieniał się w zakresie od 120 μm do 600 μm . Stan krawędzi jest zależny od parametrów szczotkowania.



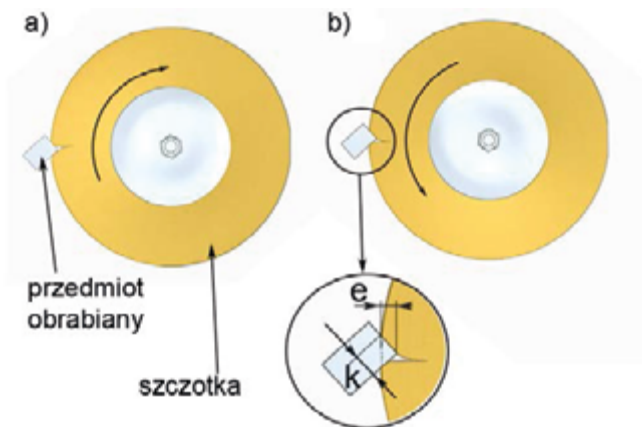
Rys. 14.18. Wpływ parametrów obróbki na wartość promienia zaokrąglenia krawędzi po szczotkowaniu: a) zmienna prędkość szczotkowania, b) zmienna prędkość posuwu [24]

Tabela 14.7. Przekroje replik oraz widok rzeczywisty zaokrąglonych krawędzi po szczotkowaniu

$v_f = 140 \text{ mm/min}$	$v_f = 370 \text{ mm/min}$	$v_f = 1000 \text{ mm/min}$	$v_f = 3700 \text{ mm/min}$
widok rzeczywisty szczotkowanych krawędzi			

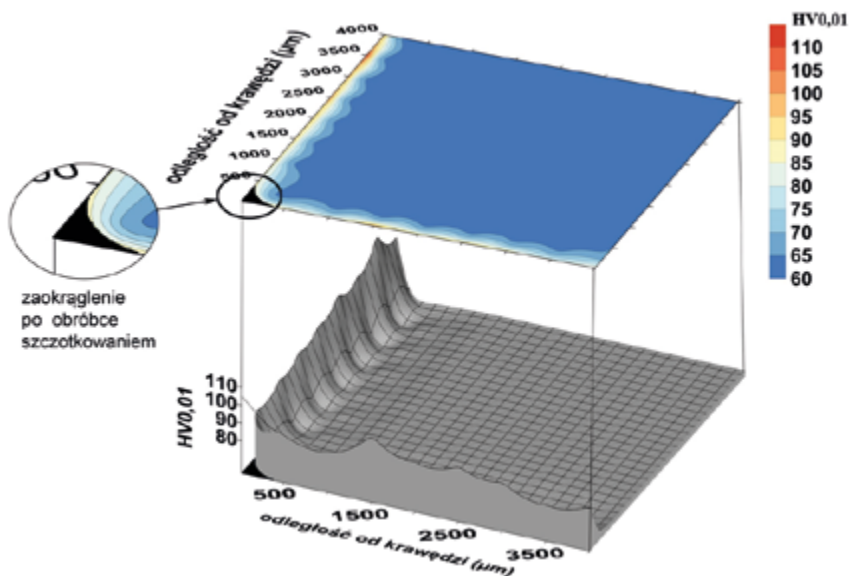
Obróbka szczotkowaniem jest procesem złożonym. Oddziaływanie włókien na materiał obrabiany ma dwójaki charakter. Końce każdego z włókien stanowiąc mogą niejako krawędzie skrawające usuwające materiał. Elastyczność włókien powoduje uginanie się ich w momencie kontaktu z przedmiotem obrabianym. Uderzające włókna mogą wykonywać pracę nagniatania. Procesowi szczotkowa-

nia może towarzyszyć znaczny wzrost temperatury, stąd istotna jest analiza właściwości fizycznych warstwy wierzchniej po procesie usuwania zadziorów metodą szczotkowania [23, 35, 36]. Na rysunku 14.19 przedstawiono strefę oddziaływania włókien „k” na powierzchnie przylegające do krawędzi obrabianej.



Rys. 14.19. Dwukierunkowa realizacja procesu usuwania zadziorów: a) pierwsze przejście - obroty prawe, b) drugie przejście - obroty lewe

Sporządzono mapy rozkładu mikrotwardości. Pomiarów mikrotwardości dokonywano na osnowie, pomijając twardszą fazę $Mg_{17}Al_{12}$. Zastosowano stałe obciążenie wglębniaka równe 10g.



Rys. 14.20. Mapa rozkładu mikrotwardości po obróbce szczotkowaniem narzędziem S03

Na rysunku 14.20 przedstawiono mapę rozkładu mikrotwardości dla stopu magnezu AZ91HP w obrębie krawędzi po procesie usuwania zadziorów dla narzędzia T3 (szczotka z drutu stalowego o średnicy pojedynczego włókna 0,3 mm). Widać wzrost mikrotwardości na obu powierzchniach przystających do krawędzi, sięgający do głębokości 150-200 μm . Spowodowane jest to zastosowaniem dwóch przejść oddziaływujących na obie powierzchnie. Zaznaczono charakterystyczne zaokrąglenie krawędzi, które dla szczotki T3 było największe. Obróbka szczotkowaniem w istotnym stopniu zwiększa mikrotwardość w obrębie krawędzi w stosunku do mikrotwardości wyjściowej uzyskanej poprzez wyżarzanie. Stopień umocnienia w odległości 10 μm wyniósł od 40% do 56%. Co ciekawe, mimo znacznie różniących się właściwości szczotek (sztywność, rodzaj włókna, średnica) nie zaobserwowano znaczącego wpływu rodzaju szczotki na wartości mikrotwardości. Należy mieć jednak na uwadze fakt, że rodzaj szczotki istotnie wpływa na chropowatość powierzchni i promień zaokrąglenia krawędzi. Umocnienie warstwy wierzchniej jest na podobnym poziomie w całej strefie oddziaływania włókien szczotki na powierzchnie przystające do obrabianej krawędzi.

Literatura

1. Adamski W., *Wybrane kierunki zwiększania wydajności procesów skrawania*, Mechanik, 5-6, 2009, 687-704.
2. Aurich J. C., Dornfeld D., Arrazola P. J., Franke V., Leitz L., Min S., *Burrs-Analysis, control and removal*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 58(2), 2009, s. 519-542.
3. Baron Y. M., Ko S., *Characterization of the Magnetic Abrasive Finishing Method and Its Application to Deburring*, Key Engineering Materials, 291-292, 2005, s. 291-296.
4. Choi I.H., Kim J.D., *A study of the characteristics of the electrochemical deburring of a governor-shaft cross hole*, Journal of Materials Processing Technology, 75, 1998, s. 198-203.
5. Ciampini, D., Papini, M., Spelt, J. K. *Characterization of vibratory finishing using the Almen system*, Wear, 264(7-8), 2008, s. 671-678.
6. Ciampini D., Papini M., Spelt J. K., *Modeling the development of Almen strip curvature in vibratory finishing*, Journal of Materials Processing Technology, 209(6), 2009, s. 2923-2939.
7. Cichosz P., Kuzinovski M., *Metody wykonywania fazek i gratowania krawędzi*, Cz. 1. Mechanik, 7, 2011, s. 353-359.
8. Cichosz P., Kuzinovski M., *Metody wykonywania fazek i gratowania krawędzi*, Cz. 2. Mechanik, 8-9, 2011, s. 674-681.
9. Dąbrowski L., Keller R., Tomczak J., *Przykłady innowacyjnego wykorzystania precyzyjnych obrabiarek ECM*, Inżynieria Maszyn, 16, 2011, s. 129-138.

10. Dąbrowski L., Marciniak M., *Trendy rozwojowe obróbki przetłoczno-ściernej, cz. I*. Design News Polska, [dostęp 14 listopada 2014] <http://www.designnews.pl/menu-gorne/artukul/article/trendy-rozwojowe-obrobki-przetloczno-ściernej-cz-i/>.
11. Fang, L., Zhao, J., Sun, K., Zheng, D., Ma, D., *Temperature as sensitive monitor for efficiency of work in abrasive flow machining*. Wear, 266(7-8), 2009, s. 678-687.
12. Gillespie L.K., Blotter P.T., *The Formation and Propierties of Machining Burrs*, Journal of Engineering for Industry 98, 1976, s. 66-74.
13. Hashimoto F., DeBra D. B., *Modelling and Optimization of Vibratory Finishing Process*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 45(1), 1996, s. 303-306.
14. Hashimura M, Hassamontr J, Dornfeld DA., *Effect of In-plane Exit Angle and Rake Angles on Burr Height and Thickness in Face Milling Operation*, Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering 121(1), 1999, s.13–19.
15. Jeong Y. H., HanYoo B., Lee H. U., Min B-K., Cho D-W., Lee S. J., *Deburring microfeatures using micro-EDM*, Journal of Materials Processing Technology, 209(14), 2009, s. 5399-5406.
16. Jiang H., Chen X., L., H., *Mineral-acid-free chemical polishing solutions for ferrous alloys*, Applied Surface Science, 218(1-4), 2003, s. 306-310.
17. Ko S. L., Baron Y. M., Park J. I., *Micro deburring for precision parts using magnetic abrasive finishing method*, Journal of Materials Processing Technology, 187-188, 2007, s. 19-25.
18. Matuszak J., Zaleski K., *Badania porównawcze obróbki krawędzi przedmiotów ze stopu aluminium 7075 i stali C45 metodą szczotkowania*, Technologia i Automatyzacja Montażu, 2, 2013, s.35-39.
19. Matuszak J., Zaleski K., *Effect of cutting fluids upon surface quality after wire brushing of 7075 aluminium alloy*, Innowacyjne Technologie Wytwarzania, red. P. Rusek, Kraków 2012, str.203-214.
20. Matuszak J., Zaleski K., *Badania stanu krawędzi przedmiotów ze stopów aluminium po procesie usuwania zadziorów*, Mechanik, 8-9, 2012, s.661.
21. Matuszak J., Zaleski K., *Powstawanie zadziorów podczas frezowania stopów aluminium w warunkach HSC*, [W:] Innovative Manufacturing Technology, Kraków 2011, s. 73-84.
22. Matuszak J., Zaleski K., *Wpływ wymiarów warstwy skrawanej na powstawanie zadziorów podczas czołowego frezowania stopu magnezu*, [W:] Obróbka Skrawaniem – Nauka a Przemysł; red. Wit Grzesik, Opole 2011, s. 238-245.
23. Matuszak J., Zaleski K., *Badania właściwości warstwy wierzchniej stopu aluminium po obróbce szczotkowaniem*, [W:] Współczesne Problemy w Technologii Obróbki Przez Nagniatanie, Tom III, monografia pod red. W. Przybylskiego, Gdańsk 2011 ,s. 307-318.

24. Matuszak J., Zaleski K., *Effect of brushing parameters upon edge states after wire brushing of AZ91 HP magnesium alloy*, *Advances in Science & Technology – Research Journal*, 2013, Vol. 7 Issue 20, s. 55-60.
25. Matuszak J., Zaleski K., *Effect of milling parameters upon burr formation during AZ91HP magnesium alloy face milling*, [W:] *New materials and it technologies in production engineering*, red. A. Świć, Lublin 2011, s. 31-43.
26. Matuszak J., Zaleski K. *Badania chropowatości powierzchni i mikrotwardości warstwy wierzchniej wybranych stopów aluminium i magnezu po obróbce frezowaniem*, [W:] *Obróbka Skrawaniem Współczesne Problemy* pod red. B. Kruszyńskiego, Politechnika Łódzka 2010 , s.349-356.
27. Oczóś K. E., *Kierunki zwiększania produktywności procesów skrawania*, *Mechanik*, 5–6, 2007, s. 328-448.
28. Prathap R., Raghavendra B. V., Pradeep. B. S., *A Case Study to Setup Optimum Process Parameters in Thermal Deburring for Removing the Burr in Barrel of Fuel Injector Pump Using Taguchi Approach*, *Journal of Engineering*, 2, 2012, s. 26-35.
29. Pogan J., *Odpady po obróbce wibrościerniej*, *Recykling*, 9, 2007, s. 24-25.
30. Sarkar S., Mitra S., Bhattacharyya B., *Mathematical modeling for controlled electrochemical deburring (ECD)*, *Journal of Materials Processing Technology*, 147, 2004, s. 241-246.
31. Vinoo T., *Magnetic abrasive finishing of internal surfaces*, 1994.
32. Wang S., Timsit R.S., Spelt J.K., *Experimental investigation of vibratory finishing of aluminum*, *Wear*, 243, 2000, s. 147-156.
33. Wantuch E., Rajchel B., Burakowski T., J., R., *Wpływ pola magnetycznego podczas polerowania magnetościernego na wybrane cechy warstwy wierzchniej przedmiotu*, *Maintenance And Reliability*, 4, 2010, s. 61-71.
34. Yamaguchi H., Shinmura T., *Study of an internal magnetic abrasive finishing using a pole rotation system*, *Discussion of the characteristic abrasive behavior. Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 24, 2000, s. 237-244.
35. Zaleski K., Matuszak J., *Odkształcenia cieplne przedmiotów ze stopu aluminium w toczeniu*, [W:] *Obróbka Skrawaniem Nauka a Przemysł*, red. W. Grzesik, Opole 2011, s. 319-326.
36. Zaleski K., Matuszak J., *Wpływ parametrów nagniatania tocznego na strukturę geometryczną powierzchni stopu magnezu*, [W:] *Współczesne Problemy w Technologii Obróbki Przez Nagniatanie*, Tom III, red. W. Przybylski, Gdańsk 2011 s. 268-279.
37. ISO 13715/2000, *Technical drawings – Edges of undefined shape – Vocabulary and indications*.
38. www.altis-szczotki.pl [dostęp 11 listopada 2014]

15. Perspektywy rozwoju obróbki skrawaniem stopów aluminium i magnezu

Stopy aluminium i magnezu mają duże znaczenie w technice. Mała masa właściwa i dostateczna wytrzymałość są podstawowymi właściwościami przesądzającymi o atrakcyjności tych stopów jako tworzywa konstrukcyjnego. Metodami obróbki skrawaniem kształtowane są głównie ze stopów aluminium i magnezu elementy maszyn, urządzeń i przedmiotów codziennego użytku.

Jednym z głównych odbiorców stopów aluminium i magnezu jest przemysł lotniczy i samochodowy. Wytwarzanie elementów maszyn transportowych ze stopów lekkich umożliwia zmniejszenie masy tych maszyn, co wiąże się z możliwością zwiększenia ładowności, poprawy parametrów ruchu, zmniejszenia zużycia paliwa. Szacuje się, że zmniejszenie masy pojazdu o 100 kg powoduje redukcję zużycia paliwa o 0,5 l/100 km [2]. Obniżenie zużycia paliwa ma duże znaczenie nie tylko ekonomiczne ale również ekologiczne, ponieważ powoduje zmniejszenie emisji dwutlenku węgla do atmosfery. Dąży się do zwiększenia w budowie samochodów ilości części wykonanych ze stopów magnezu, aby ich masa w jednym samochodzie przekraczała 100 kg. Uwzględniając prognozowany wzrost liczby produkowanych samochodów szacuje się, że w roku 2020 produkcja magnezu dla potrzeb przemysłu motoryzacyjnego będzie kilkakrotnie większa niż obecnie i osiągnie poziom około 5 milionów ton [7]. Również przewidywany jest wzrost zastosowania aluminium w budowie samochodów. Według prognoz [5] masa części ze stopów aluminium w samochodzie wzrośnie z około 110 kg w roku 1996 do 250-340 kg w roku 2015.

O rosnącym znaczeniu stopów lekkich świadczy wzrost produkcji aluminium i magnezu w ostatnich latach. Światowa produkcja aluminium pierwotnego wzrosła w latach 2000-2009 o 51,9% [6], a wzrost produkcji magnezu w latach 1994-2006 wyniósł 132,0% [7]. Według prognoz zużycie aluminium w 2050 roku będzie około dwukrotnie większe w porównaniu z rokiem 2010 i osiągnie wartość przekraczającą 700 mln ton (wzrost ten przewidywany jest głównie w Chinach oraz, w mniejszym stopniu, w Stanach Zjednoczonych) [4].

Wzrost produkcji aluminium i magnezu jest związany, między innymi, z rozwojem środków transportu. W latach 2000-2010 w Polsce przewozy ładunków transportem lotniczym zwiększyły się o 30,3%, liczba pasażerów korzystających

z linii lotniczych wzrosła o 73,3% [6]. W tym samym okresie liczba użytkowanych w Polsce samochodów osobowych zwiększyła się o 72,6%, a samochodów ciężarowych o 57,0% [6].

Powyższe liczby świadczą o dynamicznym rozwoju środków transportu. Wprawdzie można się spodziewać pewnego osłabienia tej dynamiki wzrostu (mniejszy wzrost można zaobserwować w krajach bardziej rozwiniętych od Polski), niemniej należy sądzić, że produkcja maszyn transportowych utrzyma się na wysokim poziomie, a tym samym będzie duże zapotrzebowanie na części wytwarzane ze stopów aluminium i magnezu.

Elementy ze stopów aluminium i magnezu muszą, na ogół, spełniać wysokie wymagania odnośnie dokładności wymiarowo-kształtowej oraz chropowatości powierzchni. Dużą dokładność oraz małą chropowatość obrabianych powierzchni może zapewnić obróbka skrawaniem, a zwłaszcza technologia skrawania z dużymi prędkościami (HSM). Stopy metali lekkich zaliczane są do materiałów wchodzących w zakres stosowania technologii HSM [3]. Można się spodziewać, że rozwój technologii HSM stosowanej do obróbki stopów aluminium i magnezu przyczyni się do poprawy stanu powierzchni ze względu na „bezdrżaniowy” charakter tej obróbki, do zwiększenia dokładności elementów cienkościennych dzięki zmniejszeniu sił skrawania, a także do zmniejszenia czasu obróbki.

Udział obróbki skrawaniem w procesie wytwarzania elementów lotniczych zwiększa się również z powodu tendencji do odstępowania od produkcji polegającej na łączeniu prostych części, np. przez nitowanie, a wprowadzania na ich miejsce elementów jednolitych, o złożonym kształcie, wytwarzanych z prostopadłościennych płyt. Wytwarzanie takich elementów wymaga, niekiedy, usunięcia nawet 95% materiału półfabrykatu. Usuwanie dużej objętości materiału w krótkim czasie jest możliwe dzięki zastosowaniu obróbki wysokowydajnej (HPM) [1, 3].

W ostatnich latach nastąpił duży postęp w budowie narzędzi skrawających (materiały narzędziowe, powłoki przeciwzużyciowe, konstrukcja) oraz maszyn technologicznych (wzrost prędkości obrotowej wrzeciona, wzrost prędkości posuwu, sztywna konstrukcja), co przyczyniło się do rozwoju technologii skrawania z dużymi prędkościami oraz obróbki wysokowydajnej. Można przypuszczać, że tendencja ta utrzyma się również w następnych latach i korzystnie wpłynie na jakość elementów wytwarzanych ze stopów aluminium i magnezu oraz na wydajność ich obróbki.

Stopy aluminium, z wyjątkiem wysokokrzemowych stopów odlewniczych, oraz stopy magnezu zaliczane są do materiałów łatwo skrawalnych. Jednakże również podczas obróbki skrawaniem tych stopów występują pewne trudności, związane z dużymi odkształceniami obróbkowymi stopów aluminium (mały moduł Younga, duże naprężenia własne), niebezpieczeństwem „samozapłonu” stopów magnezu, duża podatność na powstawanie zadziórów podczas obróbki. Autorzy mają nadzieję, że przedstawione w niniejszej pracy wyniki badań pomogą w pokonywaniu tych trudności.

Literatura

1. Burek J., Płodzień M.: *Wysokowydajna obróbka części ze stopów aluminium o złożonych kształtach*. Mechanik 7/2012, s. 542-549.
2. Fajkiel A., Białobrzeski A., Dudek P., Reguła T.: *Nowoczesne stopy oraz metody odlewania magnezu w zastosowaniach motoryzacyjnych*. Przegląd Mechaniczny 2/2009, s. 30-35.
3. Grzesik W.: *Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych*. WNT Warszawa 2010.
4. Hatayama H., Daigo I., Matsuno Y., Adachi Y.: *Evolution of aluminum recycling initiated by the introduction of next – generation vehicles and scarp sorting technology*. Resources, Conservation and Recycling 66 (2012) 8-14.
5. Miller W.S., Zhuang L., Bottema J., Wittebrood A.J., Smet P.De., Haszler A., Vieeregge A.: *Recent development in aluminum alloys for the automotive industry*. Materials Science and Engineering A280 (2000) 37-49.
6. *Rocznik statystyczny Rzeczypospolitej Polskiej 2012*. GUS Warszawa, rok LXXII.
7. Saternus M.: *Magnez, technologia, produkcja, perspektywy*. Rudy Metale R53, 2008, nr 6, s. 337-350.

Zakończenie

Przedstawione wyniki badań, także przytoczony stan wiedzy na temat obróbki stopów aluminium i magnezu, choć obszerne, nie wyczerpują stanu zagadnienia. Pojawiają się wciąż nowe stopy tych materiałów, zmieniają się obszary ich zastosowania. To implikuje nowe oczekiwania w zakresie doskonalenia sposobów i metod obróbki. Niemniej jednak wiedza zawarta w tej książce pozwala uważnemu Czytelnikowi na kształtowanie umiejętności prognozowania skutków zastosowanej strategii obróbki, skutków przyjęcia takich a nie innych narzędzi czy warunków obróbki. Istotnym elementem zgromadzonej wiedzy jest wykazanie, że można istotnie zwiększyć wydajność obróbki skrawaniem stopów aluminium i magnezu w stosunku do aktualnie osiągniętych wydajności w przemyśle krajowym. Wykazano, że nawet w warunkach obróbki na sucho stopów magnezu, stosując zalecane parametry technologiczne, można bezpiecznie obrabiać te stopy, jeżeli za kryterium bezpieczeństwa przyjmiemy możliwość zapłonu wiórów podczas obróbki. Dużo uwagi poświęcono obróbce stopów aluminium. Ta grupa materiałów jest bardzo zróżnicowana w aspekcie skrawalności. Producenci narzędzi rzadko różnicują ich cechy geometryczne dla różnych gatunków tych stopów. Jak wykazano w książce takie zróżnicowanie cech geometrycznych jest niezbędne. Inna jest skrawalność stopów o składzie zbliżonym do czystego Al., są to stopy miękkie, ich obróbka jest utrudniona ze względu na „plastyczność” materiału, wymaga stosowania „ostrej” geometrii. Grupa wysokowytrzymałych durali jest z reguły dobrze obrabialna, natomiast grupa nadeutektycznych siluminów trudna do obróbki ze względu na wzmożoną ścieralność ostrza przez nierozpuszczone ziarna krzemu.

Autorzy wyrażają przekonanie, że książka ta pomoże studentom w zdobywaniu wiedzy praktycznej, a pracownikom przedsiębiorstw będzie przydatnym poradnikiem w projektowaniu procesów technologicznych elementów wykonywanych ze stopów magnezu i aluminium.

Spis rysunków

Rys. 1.1. Fragment typowego wykresu równowagi stopów Al z zaznaczeniem zakresów stężenia stopów do przeróbki plastycznej, umacnianych przez zgniot i utwardzanych wydzieleniowo, oraz stopów odlewniczych [2]	14
Rys. 1.2. Podział stopów aluminium do przeróbki plastycznej [8, 11].....	15
Rys. 1.3. Oznaczenie stopów aluminium do przeróbki plastycznej: a) numeryczne, b) według składu chemicznego [6, 7, 11]	18
Rys. 1.4. Podział odlewniczych stopów aluminium [11]	21
Rys. 1.5. Oznaczenie odlewniczych stopów aluminium: a) numeryczne, b) według składu chemicznego [6, 7, 11]	22
Rys. 2.1. Porównanie masy właściwej różnych materiałów konstrukcyjnych [32] 28	
Rys. 2.2. Typowe elementy wykonywane ze stopów Mg na potrzeby przemysłu lotniczego [13, 27, 33-34, 36-40].....	34
Rys. 2.3. Kadłub silnika BMW 3.0 wykonany ze stopu Al oraz stopu Mg [12, 14].....	35
Rys. 3.1. Kształt wiórów przy obróbce różnymi narzędziami; a) frez monolityczny – stal szybko tnąca, b) frez składany – płytka węglkowa z powłoką TiN, c) frez monolityczny – węglk bez powłoki [60].....	43
Rys. 3.2. Widok powierzchni obrobionej przedmiotu wykonanego z odlewniczego stopu Al-Si.....	44
Rys. 3.3. Zależność parametru Ra od prędkości skrawania v_c podczas obróbki stopów Al [30, 55].....	45
Rys. 3.4. Powstawanie narostu na krawędzi skrawającej; a) ostrze bez powłoki ochronnej, b) powłoka TiAlCrYN, c) powłoka diamentowe DLC, d) powłoka TiAlN/VN [26].....	46
Rys. 3.5. Zużycie powierzchni przyłożenia przy obróbce nadeutektycznego stopu AC-AlSi21CuNi; a) frez monolityczny – stal szybko tnąca ($v_c=75m/min$), b) frez składany – płytka węglkowa z powłoką TiN ($v_c=300m/min$), c) frez monolityczny – węglk bez powłoki ($v_c=300m/min$; droga frezowania ok. 3,5m)	47

Rys. 3.6. Zmiany: a) składowej F_x siły skrawania oraz jej amplitudy, b) chropowatości powierzchni, w zależności od wartości zużycia przy obróbce nadeutektycznego stopu AC- $AlSi21CuNi$, frezom węglkowym niepowlekanym	48
Rys. 3.7. Zmiany sił skrawania w zależności od prędkości skrawania v_c przy obróbce różnych stopów aluminium ($f_z=0,07mm/ostre$, $a_p=12mm$, $a_e=0,85mm$)	49
Rys. 3.8. Siła skrawania przy obróbce stopu $AlSiMgMn$ narzędziami bez powłoki oraz z dwiema różnymi powłokami ochronnymi, w zależności od prędkości v_c (grubość powłok: TiB_2 – ok. $1\mu m$; $TiAlCN$ – ok. $2\mu m$; $f_z=0,08mm/ostre$, $a_p=12mm$, $a_e=1mm$)	50
Rys. 3.9. Siła skrawania w zależności od prędkości v_c przy obróbce stopu AC- $AlSi7Mg$ z różnymi rodzajami chłodzenia i smarowania strefy skrawania ($a_p=2mm$, $a_e=35mm$, $f_z=0,8 mm/ostre$) [33]	51
Rys. 3.10. Wpływ posuwu na chropowatość powierzchni (parametr R_a) po frezowaniu frezem trzpieniowym węglkowym stopów AZ91HP i AZ31, $v_c=200m/min$, $a_p=6mm$ [81]	55
Rys. 3.11. Wpływ prędkości skrawania na parametr R_a po frezowaniu stopów lekkich, $f_z=0,15mm/ostre$, $a_p=3mm$ [45]	56
Rys. 3.12. Wpływ parametrów technologicznych na jakość powierzchni po frezowaniu stopów magnezu: a) wpływ prędkości skrawania, $f_z=0,15mm/ostre$, $a_p=6mm$; b) wpływ posuwu na ostrze, $v_c=800m/min$, $a_p=6mm$ [36, 84, 85] ..	57
Rys. 3.13. Wpływ posuwu na ostrze f_z na wartość składowej siły skrawania F_y ; $v_c=300m/min$, $a_p=6mm$ [38, 83, 84]	59
Rys. 3.14. Pomiar temperatury w strefie skrawania przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej, rysunek przedstawiający wykres zmienności temperatury w sekwencji zdjęć termicznych podczas skrawania narzędziem z geometrią typu Kordell stopu magnezu AZ31 (wpływ prędkości skrawania v_c na temperaturę wióra w strefie skrawania); $f_z=0,15mm/ostre$, $a_p=6mm$ [89]	62
Rys. 3.15. Wpływ prędkości skrawania v_c na zmiany temperatury wióra w strefie skrawania, na wykresie uwzględniono wszystkie dane z sekwencji zdjęć termicznych; narzędzie z geometrią typu Kordell, stop Mg AZ31, $f_z=0,15mm/ostre$, $a_p=6mm$ [89]	62
Rys. 3.16. Wpływ głębokości skrawania a_p na masę wiórów po frezowaniu w przypadku zastosowania narzędzia węglkowego z powłoką $TiAlN$; $v_c=300m/min$, $f_z=0,15mm/ostre$ [37]	63
Rys. 3.17. Zapłon wiórów ze stopów magnezu AM50A oraz AZ91D podczas frezowania [4, 25]	64

Rys. 3.18. Wpływ: a) prędkości skrawania v_c b) posuwu na ostrze f_z na mikrotwardość stopów lekkich [45].....	65
Rys. 3.19. Wpływ parametrów obróbki frezowaniem na mikrotwardość: a) wpływ prędkości skrawania: próbka bazowa ($v_c=150\text{m/min}$, $f_z=0,05\text{mm/}$ ostrze, $a_p=0,5\text{mm}$), TiAlN/PKD $v_c=1200\text{m/min}$ ($f_z=0,15\text{mm/}$ ostrze, $a_p=6\text{mm}$); b) wpływ posuwu na ostrze: próbka bazowa ($v_c=150\text{m/min}$, $f_z=0,05\text{mm/}$ ostrze, $a_p=0,5\text{mm}$), TiAlN/PKD $f_z=0,3\text{mm/}$ ostrze ($v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$) [80]	66
Rys. 3.20. Mikrotwardość warstwy wierzchniej stopów magnezu, w przypadku frezowania: a) narzędziem z ostrzem PKD: prędkość skrawania $v_c=1200\text{m/min}$ ($f_z=0,15\text{mm/}$ ostrze, $a_p=6\text{mm}$); b) narzędziem węglkowym z powłoką TiAlN: posuw na ostrze $f_z=0,3\text{mm/}$ ostrze ($v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$) [80].....	67
Rys. 4.1. Model drgań samowzbudnych	77
Rys. 4.2. Model procesu frezowania walcowo-czołowego	82
Rys. 4.3. Schemat frezowania czołowego.....	83
Rys. 4.4. Model frezowania o jednym stopniu swobody	84
Rys. 5.1. Schemat układu pomiarowego.....	88
Rys. 5.2. Statystyczne parametry składowych F_x i F_y siły skrawania w funkcji prędkości skrawania.....	89
Rys. 5.3. Statystyczne parametry składowych F_x i F_y siły skrawania w funkcji posuwu	90
Rys. 5.4. Średnie wartości sił skrawania podczas frezowania stopu AW 7075	91
Rys. 5.5. Średnie wartości sił skrawania podczas frezowania stopu AlSi20.....	92
Rys. 5.6. Chropowatość powierzchni po obróbce stopów AW 7075 (a, b), AlSi20 (c).....	93
Rys. 5.7. Obszary stabilności frezowania współbieżnego stopu AW 7075	94
Rys. 5.8. Obszary stabilności frezowania współbieżnego stopu AlSi20.....	95
Rys. 5.9. Statystyki składowej siły skrawania F_x dla stopu AW 7075	95
Rys. 5.10. Statystyki sił skrawania F_x (a), F_y (b), F_z (c) dla stopu AlSi20	96
Rys. 5.11. Chropowatość powierzchni po obróbce stopu AW 7075	97
Rys. 5.12. Chropowatość powierzchni po obróbce stopu AlSi20.....	98
Rys. 5.13. Zrekonstruowany atraktor na płaszczyźnie fazowej obrazujący ruch okresowy z zaburzeniami (a), subharmoniczny (b) i stochastyczny (c)	100
Rys. 5.14. Wykresy rekurencyjne dla ruchu okresowego z zaburzeniami (a), subharmonicznego (b) i stochastycznego (c)	102
Rys. 6.1. Zestaw frezów pełnowęglkowych do obróbki HPC i HSC.....	107

Rys. 6.2. Wpływ kąta natarcia γ_n na siłę posuwową F_f [17]	108
Rys. 6.3. Wpływ kąta pochylenia linii śrubowej λ_s na siłę posuwową F_f [17]	109
Rys. 6.4. Wpływ kąta pochylenia linii śrubowej λ_s na moment skrawania M_c [17]	110
Rys. 6.5. Wpływ kąta pochylenia linii śrubowej λ na chropowatość powierzchni Ra	111
Rys. 6.6. Wpływ posuwu f_z na chropowatość powierzchni Ra [18]	111
Rys. 6.7. Głowica do obróbki z dużymi posuwami	114
Rys. 7.1. Schemat blokowy przeprowadzonych pomiarów	121
Rys. 7.2. Stanowisko do pomiarów kątów zwilżania	122
Rys. 7.3. Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartości parametru chropowatości Ra stopu aluminium EN AW 7075: 1 - $v_c = 200$ m/min bez chłodzenia, 2 - $v_c = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $v_c = 1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $v_c = 1200$ m/min z chłodzeniem	123
Rys. 7.4. Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartości: a) swobodnej energii powierzchniowej, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej, stop EN AW 7075 1 - $v_c = 200$ m/min bez chłodzenia, 2- $v_c = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $v_c = 1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $v_c = 1200$ m/min z chłodzeniem	125
Rys. 7.5. Wpływ prędkości skrawania oraz warunków chłodzenia na wartości parametru chropowatości Ra stopu aluminium EN AW 7075 T651: 1 - $v_c = 200$ m/min bez chłodzenia, 2 - $v_c = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $v_c = 1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $v_c = 1200$ m/min z chłodzeniem	126
Rys. 7.6. Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartości: a) swobodnej energii powierzchniowej, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej, stop EN AW 7075 T651, 1 - $v_c = 200$ m/min bez chłodzenia, 2 - $v_c = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $v_c = 1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $v_c = 1200$ m/min z chłodzeniem	128
Rys. 7.7. Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartości parametru chropowatości Ra stopu aluminium AlSi10Mg: 1 - $v_c = 200$ m/min bez chłodzenia, 2 - $v_c = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $v_c = 1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $v_c = 1200$ m/min z chłodzeniem	129
Rys. 7.8. Wpływ prędkości skrawania oraz wariantów chłodzenia na wartości: a) swobodnej energii powierzchniowej, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej, stop AlSi10Mg; 1 - $v_c = 200$ m/min bez chłodzenia, 2 - $v_c = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $v_c = 1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $v_c = 1200$ m/min z chłodzeniem	131

- Rys. 7.9.** Wpływ prędkości skrawania wariantów chłodzenia na wartości parametru chropowatości R_a stopu magnezu AZ31: 1 - $v_c = 200$ m/min bez chłodzenia, 2 - $v_c = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $v_c = 1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $v_c = 1200$ m/min z chłodzeniem..... 132
- Rys. 7.10.** Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartości: a) swobodnej energii powierzchniowej, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej, stop AZ 31, 1 - $v_c = 200$ m/min bez chłodzenia, 2 - $v_c = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $v_c = 1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $v_c = 1200$ m/min z chłodzeniem..... 134
- Rys. 7.11.** Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartości parametru chropowatości R_a stopu magnezu AZ91HP: 1 - $v_c = 200$ m/min bez chłodzenia, 2 - $v_c = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $v_c = 1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $v_c = 1200$ m/min z chłodzeniem..... 135
- Rys. 7.12.** Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartości: a) swobodnej energii powierzchniowej, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej, stop AZ 91HP, 1 - $v_c = 200$ m/min bez chłodzenia, 2 - $v_c = 200$ m/min z chłodzeniem, 3- $v_c = 1200$ m/min bez chłodzenia, 4 - $v_c = 1200$ m/min z chłodzeniem 137
- Rys. 7.13.** Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartość: a) swobodnej energii powierzchniowej stopu aluminium EN AW 7075, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej stopu aluminium EN AW 7075 138
- Rys. 7.14.** Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartość: a) swobodnej energii powierzchniowej stopu aluminium EN AW 7075 T651, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej stopu aluminium EN AW 7075 T651..... 139
- Rys. 7.15.** Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartość: a) swobodnej energii powierzchniowej stopu aluminium AlSi10Mg, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej stopu aluminium AlSi10Mg..... 140
- Rys. 7.16.** Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartość: a) swobodnej energii powierzchniowej stopu magnezu AZ 31, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej stopu magnezu AZ 31..... 141
- Rys. 7.17.** Wpływ prędkości skrawania oraz wariantu chłodzenia na wartość: a) swobodnej energii powierzchniowej stopu magnezu AZ 91 HP, b) składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej stopu magnezu AZ 91 HP 142
- Rys. 8.1.** Wpływ zmiany posuwu na ostrze f_z na występowanie różnych frakcji wiórów w przypadku stopu AZ31; $v_c = 300$ m/min, $a_p = 6$ mm, $a_e = 14$ mm..... 148

Rys. 8.2. Wpływ rodzaju narzędzia na temperaturę wiórów podczas frezowania stopów Mg; $v_c=400\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$, $a_e=14\text{mm}$ [11]	148
Rys. 8.3. Wpływ głębokości skrawania a_p na czas do zapłonu wióra przy $v_c=300\text{m/min}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, $T_{\text{max}}=517,2^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=513,7^\circ\text{C}$	150
Rys. 8.4. Struktury lamelarne wiórów ze stopu Mg oraz poszukiwanie śladów nadtopień [1, 2]	151
Rys. 8.5. Metalograficzna analiza obszarów uplastycznionych wiórów, fotografie wiórów ze stopów: a) AZ91HP $v_c=400\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$; b) AZ31 $v_c=800\text{m/min}$, $f_z=0,3\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [6].....	151
Rys. 8.6. Wióry ze stopów magnezu: a) powierzchnia wióra poddanego zapłonowi (charakterystyczne białe ślady intensywnego utleniania); b) wiór poddany działaniu wysokiej temperatury (ok. 500°C), dla którego nie wystąpił zapłon.....	151
Rys. 8.7. Wybrane etapy przed zapłonem wióra dla stopu AZ91HP; $v_c=400\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$	152
Rys. 9.1. Udział chłodziw w kosztach produkcji [2]	160
Rys. 9.2. Podstawowy układ wytwarzania aerozolu (mgły) na przykładzie układu Accu Lube [21]	161
Rys. 9.3. Stopień biodegradacji mediów stosowanych w różnych systemach minimalnego smarowania [16].....	162
Rys. 9.4. Porównanie wartości parametru chropowatości R_a po frezowaniu stopu aluminium 7075 z zastosowaniem różnych sposobów chłodzenia dla stałej prędkości skrawania $v_c = 900 \text{ m/min}$ [16].....	164
Rys. 9.5. Porównanie wartości parametru chropowatości R_a po frezowaniu stopu aluminium AW 7075 z zastosowaniem różnych sposobów chłodzenia dla stałej wartości posuwu na ostrze $f_z = 0,2 \text{ mm/ostre}$ [16].....	164
Rys. 9.6. Układ MQL stosowany na frezarkach pionowych [17]	166
Rys. 9.7. Porównanie wartości momentu skrawania M_C podczas frezowania stopu magnezu AZ91HP na sucho i z minimalnym smarowaniem ze zmienną prędkością skrawania ($f_z=0,3 \text{ mm/ostre}$, $a_p=6 \text{ mm}$, $a_e=16 \text{ mm}$) [17].....	168
Rys. 9.8. Porównanie wartości momentu skrawania M_C podczas frezowania stopu magnezu AZ31 na sucho i z minimalnym smarowaniem ze zmienną prędkością skrawania ($f_z=0,3 \text{ mm/ostre}$, $a_p=6 \text{ mm}$, $a_e=16 \text{ mm}$), [17].....	168
Rys. 9.9. Porównanie wartości momentu skrawania M_C podczas frezowania na sucho i z minimalnym smarowaniem stopu AZ31 ze zmiennym posuwem ($v_c=900\text{m/min}$, $a_p=6 \text{ mm}$, $a_e=16 \text{ mm}$) [17]	169

Rys. 9.10. Porównanie wartości momentu skrawania M_C podczas frezowania stopu AZ31 na sucho i z minimalnym smarowaniem ze zmienną głębokością skrawania ($v_c=900$ m/min, $f_z=0,3$ mm/ostrze, $a_e=16$ mm) [17]	169
Rys. 9.11. Porównanie wartości parametru R_a chropowatości powierzchni po frezowaniu stopu magnezu AZ31 na sucho i z zastosowaniem MQL (pomiar na ścianie bocznej przedmiotu obrabianego) [16].....	170
Rys. 9.12. Porównanie wartości parametru R_a chropowatości powierzchni po frezowaniu stopu magnezu AZ31 na sucho i z zastosowaniem MQL (pomiar na dnie przedmiotu obrabianego) [16].....	170
Rys. 9.13. Porównanie wartości parametru R_a chropowatości powierzchni po frezowaniu stopu magnezu AZ91HP na sucho i z zastosowaniem MQL (pomiar na ścianie bocznej przedmiotu obrabianego) [16].....	171
Rys. 10.1. Przykłady konstrukcji cienkościennych	176
Rys. 10.2. Odkształcenia towarzyszące obróbce elementów cienkościennych a) odkształcenie ścianki i narzędzi [1], b) zarys ścianki po obróbce	176
Rys. 10.3. Efekt braku stabilności w postaci karbowania (chatter).....	177
Rys. 10.4. Frezy DHC o zróżnicowanym kącie pochylenia linii śrubowej [4].....	177
Rys. 10.5. Widok powierzchni elementów cienkościennych wykonanych ze stopu EN AW-7075 obrabianych 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.....	178
Rys. 10.6. Przykładowy wykres stabilności – krzywa workowa [2, 11]	179
Rys. 10.7. Przykładowe wykresy stabilności dla trzech różnych stopów Al.....	179
Rys. 10.8. Strategie obróbki cienkich ścianek [12, 14]	180
Rys. 10.9. Element cienkościenny wykonywane różnymi strategiami, a) model, b) element po obróbce zgrubnej strategią „choinki”	181
Rys. 10.10. Rozmieszczenie płaszczyzn i punktów pomiarowych na wykonanych ściankach.....	182
Rys. 10.11. Zarysy ścianek o grubości 0,7mm w przekrojach I-I i II-II wykonanych różnymi strategiami	183
Rys. 10.12. Zarysy ścianek w przekrojach A-A wykonanych różnymi strategiami i grubościami: a) 2,0mm; b) 1,4mm; c) 1,0mm; d) 0,7mm.	183
Rys. 10.13. Odchyłki zarysów powierzchni bocznych elementów cienkościennych wykonanych różnymi strategiami	184
Rys. 10.14. Chropowatość powierzchni elementów cienkościennych o różnych grubościach, wykonanych różnymi strategiami obróbki.....	185

Rys. 10.15. Siły skrawania dla różnych szerokości frezowania a_e w zależności v_c	186
Rys. 10.16. Modele obciążenia oraz utwierdzenia przyjęte w analizie MES: a) ścianek nieutwierdzonych, b) ścianek utwierdzonych	187
Rys. 10.17. Przemieszczenie obliczone z zastosowaniem MES dla ścianek nieutwierdzonych 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 ..	188
Rys. 10.18. Przemieszczenie obliczone z zastosowaniem MES dla ścianek utwierdzonych 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.....	189
Rys. 10.19. Przemieszczenie ścianek nieutwierdzonych w przekroju: a) środkowym, b) skrajnym.....	190
Rys. 10.20. Przemieszczenie w przekrojach środkowych ścianek utwierdzonych	190
Rys. 11.1. Przykłady konstrukcji kieszeniowych zastosowanych w elementach strukturalnych statków powietrznych [6, 9]	193
Rys. 11.2. Przykłady narzędzi o różnych wysięgach [1]	194
Rys. 11.3. Odkształcenia układu narzędzie-oprawka-wrzeciono. Poszczególne oznaczenia wymiarów odnoszą się do długości (L1, L2, L3, L4) oprawki, narzędzia itp. oraz sumarycznych odkształceń ($\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$) wrzeciona, oprawki i narzędzia. [7]	195
Rys. 11.4. Przykładowa odpowiedź układu narzędzie-oprawka-wrzeciono na wymuszenie: a) część rzeczywista, b) część urojona [4]	196
Rys. 11.5. Widoki narzędzi o różnej długości wysięgów zamocowanych we wrzecionie obrabiarki.....	197
Rys. 11.6. Zestaw do analizy modalnej	197
Rys. 11.7. Zmiana sztywności „modalnej” układu narzędzie-oprawka-wrzeciono w zależności od długości wysięgu narzędzia dla dwu kierunków pomiaru: X i Y	198
Rys. 11.8. Wartości ugięcia narzędzi o różnej sztywności dla wybranych prędkości skrawania v_c	199
Rys. 11.9. Widok geometrii mierzonych narzędzi [5].....	200
Rys. 11.10. Zmiana wartości promienia narzędzia [5]	200
Rys. 11.11. Modele i widoki próbek ze ściankami: a), b) nieutwierdzonymi; c), d) utwierdzonymi	201

Rys. 11.12. Widoki zastosowanych frezów o długości: a) 60, b) 80, c) 100, d) 120, e) 140mm.....	202
Rys. 11.13. Zarys powierzchni bocznej ścianek nieutwierdzonych 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) $2,0\text{ N}/\mu\text{m}$	204
Rys. 11.14. Zarys powierzchni bocznej ścianek nieutwierdzonych 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) $4,0\text{ mm}$, b) $2,8\text{ mm}$, c) $2,0\text{ mm}$, d) $1,4\text{ mm}$, e) $1,0\text{ mm}$, f) $0,7\text{ mm}$	205
Rys. 11.15. Chropowatość powierzchni ścianek nieutwierdzonych 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) $0,7\text{mm}$	206
Rys. 12.1. Stopnie swobody przedmiotu w przestrzeni obróbki.....	209
Rys. 12.2. Zrobotyzowana wymiana przedmiotu obrabianego w przestrzeni obróbkowej i poza nią [27].....	211
Rys. 12.3. Różne warianty rozkładu sił w układzie zamocowania przedmiotu obrabianego.....	212
Rys. 12.4. Precyzyjne imadło maszynowe Schunk KONTEC KSG z regulowaną siłą mocowania: a) budowa imadła; b) mechanizm regulacji siły zamocowania [21]	213
Rys. 12.5. Rozmieszczenie elementów mocujących względem przedmiotu obrabianego	214
Rys. 12.6. Ustalenie przedmiotu obrabianego na stole obrabiarki za pomocą płytek [15].....	215
Rys. 12.7. Przykład czujników dotykowych zegarowego i cyfrowego Haimer [25]	215
Rys. 12.8. Sondy impulsowe Heidenhain [28].....	216
Rys. 12.9. Sposoby kompensacji ukośnego ustalenia przedmiotów w przestrzeni obróbkowej na obrabiarkach: a) w układzie konwencjonalnym; b) z osią obrotową [28].....	217
Rys. 12.10. Istota kompensacji ustalenia przedmiotu poprzez przeliczenie kąta obrotu [28]	217
Rys. 12.11. Istota kompensacji ustalenia przedmiotu poprzez obrót stołu [28] ...	218
Rys. 12.12. Przykłady oprzyrządowania specjalnego do obróbki struktur cienkościennych [14].....	219

Rys. 12.13. Zamocowanie przedmiotu obrabianego: a) na zespolone imadła maszynowych; b) imadło maszynowe KONTEC KSX ze zmodyfikowanymi szczękami firmy SCHUNK [12]	220
Rys. 12.14. Bloki mocujące TANDEM firmy Schunk: a) z zamocowanym elementem; b) zasada działania modułu z zasilaniem pneumatycznym [21]	220
Rys. 12.15. System mocowania MATRIX: a) Zestaw modułowy do zabudowy na imadle maszynowym; b) Pokrywa ustalona w dwóch uchwytach; c) zamocowany w MATRIX korpus ze stopu aluminium; d) przykład obróbki elementu zamocowanego w MATRIX [20].....	221
Rys. 12.16. Przykłady położenia przedmiotu przy jego przestaleniu	222
Rys. 12.17. Klasyfikacja i podział baz wg PN-83/M-01250.....	223
Rys. 12.18. Przykład baz stykowych.....	224
Rys. 12.19. Obróbka części na dodatkowym stole uchylno-obrotowym na maszynie Hurko oraz obróbka elementu goleni samolotu przy pomocy skrętnego wrzeciona obrabiarki MCM ACTION 2600 MP6 [24,26].....	226
Rys. 12.20. Pięciostronne centrum obróbkowe DMG DMU 50ecoline wraz z przykładem części obrabianej w jednym zamocowaniu [22].....	227
Rys. 12.21. Pomiar przedmiotu obrabianego sondami Renishaw i Marposs [23,31].....	227
Rys. 12.22. Przykładowe elementy ustalające: a) sworzeń ustalający; b) para płytek równoległościennych; c) zderzak kątowy; d) kamienie ustalające swobodne; f) zderzak równoległościenny; g) pryzmy [15].....	228
Rys. 12.23. Docisk śrubowy: przesuwny z elementem pośrednim; zamocowanie przedmiotu podczas obróbki [15].....	229
Rys. 12.24. Różne przykłady łap dociskowych [15]	230
Rys. 12.25. Łapa dociskowa ze śrubową podpórką schodkową oraz jej zastosowanie [15]	230
Rys. 12.26. Łapa dociskowa nastawna z bezstopniową regulacją wysokości [15].....	231
Rys. 12.27. Przykłady wykorzystania różnych podpórek przy mocowaniu łapami [15]	232
Rys. 12.28. Przykłady konstrukcji podpórek śrubowych stosowanych przy obróbce ubytkowej [15]	232
Rys. 12.29. Przykład sworzni mocującego oraz zasady rozmieszczenia tych elementów w celu zamocowania przedmiotu obrabianego [15].....	233
Rys. 12.30. Model docisku bocznego niskiego BYK firmy AMF oraz przykład zamocowania [15]	234

Rys. 12.31. Widok docisku bocznego hakowego oraz przykład zastosowania [15].....	235
Rys. 12.32. Docisk boczny sprężysty [15]	235
Rys. 12.33. Napinacz centrujący konstrukcji AMF [15] oraz model geometryczny	236
Rys. 12.34. Różne przykłady docisków szybko mocujących stosowanych przy obróbce metali [17].....	236
Rys. 12.35. Ustalenie przedmiotu na stole podciśnieniowym i przykład obróbki frezowaniem [16].....	238
Rys. 12.36. Zwiększenie siły zamocowania poprzez zastosowanie adapterów: a) gumy; b) płyty aluminiowej [16].....	238
Rys. 12.37. Zestaw elementów mocujących z PBT oraz przykład zamocowania na elemencie cienkościennym [15].....	239
Rys. 12.38. Przykłady zamocowania przedmiotów za pomocą układów hydraulicznych [18].....	240
Rys. 12.39. System mocowania blokowego: a) jednostka mocująca; b) element pośredni; c) przykład zamocowania przedmiotu poprzez system blokowy; d) podpora śrubowa [18].....	241
Rys. 12.40. Zestaw do mocowania łańcuchowego oraz przykład zmocowania [18].....	242
Rys. 12.41. Systemy paletowe jednostronne mocowane bezpośrednio na stole i na specjalnych płytach pośrednich oraz przykłady różnej konstrukcji palet [19].....	243
Rys. 12.42. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych paletowych skrzyń kolumnowych [19].....	244
Rys. 12.43. Przykłady zamocowanie przedmiotów na skrzyniach kolumnowych [16,21].....	245
Rys. 12.44. Budowa modułu VERO-S oraz etap bazowania i mocowania w module [21].....	246
Rys. 12.45. System wielomodułowy w układzie tradycyjnym oraz możliwy błąd wywołany takim rozwiązaniem [21,32].....	246
Rys. 12.46. Schemat rozmieszczenia sworzni bazujących w systemie wielomodułowym oraz przyczyna powstawania błędu podczas rotacji stołu [32]	247
Rys. 12.47. Opcjonalne rozmieszczenie pozwalające kompensować wpływ temperatury [32].....	247
Rys. 13.1. Budowa warstwy wierzchniej.....	255

Rys. 13.2. Właściwości warstwy wierzchniej	256
Rys. 13.3. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni po nagniataniu wibracyjnym stopu aluminium AW2024 dla różnych częstotliwości nagniatania v (amplituda drgań wibratora $a = 14$ mm, średnica kulek $D_k = 6$ mm, czas nagniatania $t = 10$ min [27]	261
Rys. 13.4. Porównanie wartości bezwzględnej maksymalnych ściskających naprężeń własnych σ_m (a) oraz głębokości „zalegania” ściskających naprężeń własnych g_s (b) dla stopów aluminium AW2024 i AW7075 po nagniataniu wibracyjnym ($a = 14$ mm, $v = 23,3$ Hz, $D_k = 6$ mm, $t = 10$ min)	262
Rys. 13.5. Rozkład naprężeń własnych w funkcji odległości od powierzchni po szczotkowaniu: a) stopu aluminium AW7075, b) stopu magnezu AZ31.....	263
Rys. 14.1. Ośmioetapowy schemat formowania zadzioru [14]	268
Rys. 14.2 Zadziór typu „cut off” zaobserwowany podczas frezowania: a) widok zadzioru, b) końcowa faza separacji próbki	268
Rys. 14.3. Typy zadziorów powstających podczas frezowania współbieżnego (opis w tekście).....	269
Rys. 14.4. Typy zadziorów powstających podczas frezowania przeciwbieżnego (opis w tekście).....	269
Rys. 14.5. Kąt wyjścia.....	270
Rys. 14.6. Wpływ kąta wyjścia Φ na wysokość zadzioru wyjściowego dla różnych prędkości skrawania v_c [22]	271
Rys. 14.7. Wpływ kąta wyjścia Φ na wysokość zadzioru wyjściowego dla różnych wartości posuwu na ostrze [22]	271
Rys. 14.8. Wpływ posuwu na ostrze na wysokość zadzioru górnego [21].....	273
Rys. 14.9. Wpływ prędkości skrawania na wysokość zadzioru wyjściowego [21].....	273
Rys. 14.10. Stany występujące na krawędziach: a) zewnętrznych, b) wewnętrznych [37].....	274
Rys. 14.11. Wartości odchyłki od nominalnej krawędzi	275
Rys. 14.12. Rodzaje wypełnień stosowanych na włókna szczotek [38].....	280
Rys. 14.13. Podział szczotek: a) czołowe, b) walcowe.....	281
Rys. 14.14. Kierunek pomiaru chropowatości: a) schemat próbki, b) przykładowy profil, c) rzeczywisty widok próbki po frezowaniu [19]	282
Rys. 14.15. Wpływ prędkości posuwu na chropowatość powierzchni dla szczotki T3: a) obróbka na sucho, b) obróbka z chłodzeniem [19].....	283
Rys. 14.16. Widok repliki	284

Rys. 14.17. Schemat stanowiska i kinematyka procesu usuwania zadziorów: a) widok z przodu, b) widok z boku	284
Rys. 14.18. Wpływ parametrów obróbki na wartość promienia zaokrąglenia krawędzi po szczotkowaniu: a) zmienna prędkość szczotkowania, b) zmienna prędkość posuwu [24]	286
Rys. 14.19. Dwukierunkowa realizacja procesu usuwania zadziorów: a) pierwsze przejście - obroty prawe, b) drugie przejście - obroty lewe	287
Rys. 14.20. Mapa rozkładu mikrotwardości po obróbce szczotkowaniem narzędziem S03.....	287



Publikacja bezpłatna.

Badania realizowane w ramach Projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO

