



mgr inż. Ireneusz Zagórski

Wpływ warunków technologicznych na efektywność i bezpieczeństwo frezowania stopów magnezu

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

ROZPRAWA DOKTORSKA

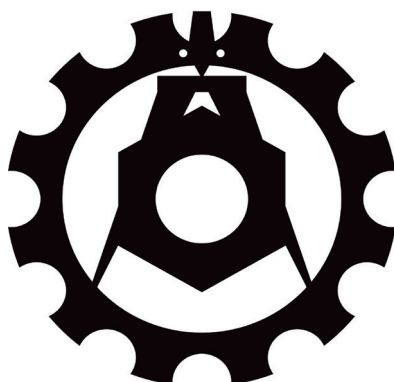
*Panu promotorowi
prof. dr hab. inż. Józefowi Kuczmazewskiemu składam
serdeczne podziękowania za wkład merytoryczny,
opiekę naukową oraz cenne uwagi w trakcie realizacji
rozprawy doktorskiej*

*Dziękuję również wszystkim osobom, z którymi
współpracowałem przygotowując rozprawę
oraz moim bliskim, którzy mnie wspierali*

POLITECHNIKA LUBELSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

ROZPRAWA DOKTORSKA



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

mgr inż. Ireneusz Zagórski

Wpływ warunków technologicznych na efektywność i bezpieczeństwo frezowania stopów magnezu

Promotor:

prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski



Politechnika Lubelska
Lublin 2014

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



**INNOWACYJNA
GOSPODARKA**
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE – ABSTRACT.....	7
WYKAZ STOSOWANYCH SKRÓTÓW I SYMBOLI.....	8
1. WPROWADZENIE	9
2. MAGNEZ, STOPY MAGNEZU ORAZ ICH ZASTOSOWANIE	11
2.1. Wprowadzenie, otrzymywanie magnezu	11
2.2. Właściwości magnezu, jego stopów oraz zastosowanie	11
2.2.1. Odlewnicze stopy magnezu	17
2.2.2. Stopy magnezu do obróbki plastycznej	18
2.2.3. Stopy magnezu wytwarzane szybkim krzepnięciem	20
2.3. Metody kształtowania stopów magnezu	20
2.4. Ocena skrawalności stopów magnezu	20
2.5. Ciepło w procesach obróbki skrawaniem	32
2.6. Wnioski z analizy literatury	37
3. TEMAT, CEL, HIPOTEZY BADAWCZE I ZAKRES ROZPRAWY ..	39
3.1. Uzasadnienie podjęcia tematu.....	39
3.2. Sformułowanie problemu badawczego.....	39
3.3. Hipotezy badawcze rozprawy	40
3.4. Cel i zakres rozprawy	41
4. METODYKA BADAŃ.....	42
4.1. Obiekt badań	42
4.1.1. Metodyka badań chropowatości powierzchni po obróbce frezowaniem.....	45
4.1.2. Metodyka badań mikrotwardości warstwy wierzchniej	45
4.1.3. Metodyka badań sił skrawania oraz ich amplitud	46
4.1.4. Metodyka badań masy wiórów ze stopów Mg.....	47
4.1.5. Metodyka badań czasu do zapłonu wiórów ze stopów Mg.....	48
4.1.6. Metodyka badań temperatury w strefie skrawania	50
4.1.7. Dynamiczne zjawiska w strefie skrawania podczas pomiaru temperatury wiórów.....	52
4.1.8. Metodyka badań morfologii wiórów ze stopów Mg.....	53
4.2. Metodyka statystycznego opracowania wyników badań	54

5. WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH	57
5.1. Wyniki badań	57
5.1.1. Wyniki badań chropowatości powierzchni po obróbce frezowaniem	57
5.1.2. Wyniki badań mikrotwardości	63
5.1.3. Wyniki badań sił skrawania oraz ich amplitud	67
5.1.4. Wyniki badań masy wiórów ze stopów Mg.....	72
5.1.5. Wyniki badań czasu do zapłonu wiórów ze stopów Mg.....	91
5.1.6. Wyniki badań temperatury w strefie skrawania	105
5.1.7. Wyniki badań zjawisk dynamicznych w strefie skrawania podczas pomiaru temperatury wiórów.....	114
5.1.8. Wyniki badań morfologii wiórów ze stopów Mg.....	118
5.2. Statystyczne opracowanie wyników badań własnych	122
6. DYSKUSJA WYNIKÓW BADAŃ	127
6.1. Rezultaty poznawcze i praktyczne	130
6.2. Wnioski końcowe	133
SPIS RYSUNKÓW I TABEL.....	135
LITERATURA.....	141

STRESZCZENIE – ABSTRACT

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL CONDITIONS ON THE EFFECTIVENESS AND SAFETY DURING MILLING MAGNESIUM ALLOYS

W pracy przedstawiono wpływ zmiany parametrów technologicznych oraz rodzaju narzędzia na wskaźniki skrawalności dwóch stopów magnezu AZ31 i AZ91HP. W badaniach skupiono się na procesie frezowania, ponieważ większość elementów, wytwarzanych m.in. na potrzeby przemysłu lotniczego, poddawanych jest operacji frezowania. W badaniach wykorzystano narzędzia: frez węglkowy z powłoką TiAlN, frez węglkowy o geometrii typu Kordell, frez z ostrzem PKD. Analizowano takie wskaźniki skrawalności jak: chropowatość powierzchni, mikrotwardość powierzchni oraz mikrotwardość warstwy wierzchniej, siły oraz amplitudy sił skrawania, temperaturę w strefie skrawania. Przeprowadzono ponadto badania morfologii wiórów ze stopów Mg, badano masę jednostkową wiórów, czas oraz temperaturę zapłonu wiórów, wyróżniono fazy poprzedzające zapłon wióra.

Udowodniono, że można prowadzić obróbkę frezowaniem stopów magnezu w sposób zarówno efektywny oraz bezpieczny.

The present thesis deals with the influence of changes in technological parameters and machine tool types on machinability of two magnesium alloys AZ31 and AZ91HP. The conducted research focused on milling, considering the fact that a great majority of elements produced for e.g. the aviation industry undergo milling. The research involved the following machine tools: carbide TiAlN coated end mill, carbide Kordell design end mill and a PCD cutting edge. Surface roughness, surface and surface layer microroughness, cutting forces and their amplitudes as well as cutting area temperature were analysed during the study. The research included additional tests of Magnesium alloy chip morphology, specific gravity of chips, chip ignition time and temperature, which allowed to distinguish stages to chip ignition.

This thesis proves that magnesium alloy machining can be both efficient and safe.

WYKAZ STOSOWANYCH SKRÓTÓW I SYMBOLI

Ra	– średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych profilu chropowatości,
Rz (DIN)	– średnia arytmetyczna największej wysokości profilu wyznaczonej na kolejnych pięciu odcinkach elementarnych (inne oznaczenie Rtm),
HSM	– obróbka wysokowydajna, obróbka z dużymi prędkościami skrawania (<i>ang. High Speed Machining</i>),
HPC	– skrawanie wysokowydajne – technika właściwa dla obróbki kształtującej (<i>ang. High Performance Cutting</i>),
HSC	– skrawanie szybkościowe – technika właściwa dla obróbki wykończeniowej (<i>ang. High Speed Cutting</i>),
TiAlN	– powłoka tytanowa z azotkiem aluminium,
PKD	– ostrze z polikrystalicznego diamentu,
v_c	– prędkość skrawania,
f_z	– posuw na ostrze,
a_p	– głębokość skrawania,
a_e	– szerokość skrawania,
F_x, F_y, F_z	– składowe siły skrawania,
AF_x, AF_y, AF_z	– amplitudy składowych sił skrawania,
m	– masa jednostkowa wiórów,
t	– czas do zapłonu wiórów,
T_{max}	– temperatura maksymalna (np. płyty grzewczej, wióra),
$T_{\bar{s}}$	– temperatura średnia.

1. WPROWADZENIE

Wytwarzanie nowoczesnych elementów maszyn związane jest z potrzebą szybkiego usuwania naddatków obróbkowych. Stale dąży się do obniżania zarówno kosztów wytwarzania jak i eksploatacji maszyn [41, 42, 43]. W lotnictwie produkcja coraz lżejszych samolotów bądź śmigłowców związana jest z wytwarzaniem części o małej masie. Większość elementów obrabianych na potrzeby przemysłu lotniczego poddawana jest obróbce frezowaniem. Dąży się do tego, aby frezowanie mogło być zarówno pierwszą operacją (obróbką zgrubną) jak i ostatnią (wykończeniową) w procesie wykonywania określonego elementu. Usuwanie dużych ilości materiału obrabianego, wymaga z reguły długotrwałej obróbki. Stosowanie nowoczesnych technik efektywnej obróbki wysokowydajnej (typu HSM, HPC bądź HSC), wiąże się z koniecznością stosowania nowoczesnych centrów obróbkowych (wysokoobrotowych elektro-wrzecion) oraz nowych materiałów narzędziowych. Zastosowanie wydajnej obróbki frezowaniem pozwala na uzyskanie powierzchni o wysokiej jakości, zmniejszenie kosztów produkcji (eliminacja szlifowania), wzrost wydajności oraz efektywności wytwarzania (skrócenie czasu obróbki). Wraz z poszerzaniem obszaru zastosowań stopów magnezu, jako materiału konstrukcyjnego w różnych gałęziach przemysłu wzrasta znaczenie sposobu jego racjonalnej i dokładnej obróbki.

Odlewane i obrabiane plastycznie elementy wytwarzane ze stopów magnezu znajdują powszechne zastosowanie w budowie maszyn. Na potrzeby przemysłu lotniczego czy motoryzacyjnego wytwarzane są takie elementy jak: wręgi, wsporniki, podłużnice, różnego rodzaju obudowy oraz drobne elementy wyposażenia [5, 18]. Frezowanie, np. powierzchni uszczelniających lub przylgowych, stanowi częsty zabieg obróbkowy, wykonywany na odlewach ciśnieniowych ze stopów magnezu. Wykonanie z określoną dokładnością odpowiednich powierzchni płaskich, bądź otworów elementów odlewanych, to częsty zabieg obróbkowy wykonywany poprzez frezowanie na elementach typu obudowa lub korpus.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa obróbki interesująca jest maksymalna temperatura generowana w strefie skrawania, przy której mógłby wystąpić zapłon wiórów podczas obróbki. Głównym powodem podjęcia tematu rozprawy jest brak dostatecznej wiedzy nt. obróbki stopów magnezu, a zwłaszcza generowanej temperatury w strefie skrawania oraz, co jest bezpośrednio z tym związane, bezpieczeństwem obróbki.

Podjęcie tematu jest podyktowane również zachowawczym i z reguły nie popartym odpowiednimi badaniami i analizami traktowaniem doboru warunków skrawania przy frezowaniu stopów magnezu. W zakładach prowadzących obróbkę skrawaniem stopów Mg najczęściej warunki obróbki nie były zmieniane, czasem od lat, z obawy przed niebezpieczeństwem zapłonu wiórów.

W katalogach producentów narzędzi brak jest wytycznych doboru parametrów skrawania.

Stopy magnezu są interesującym tworzywem konstrukcyjnym nowej generacji, mimo iż są one znane już od drugiej wojny światowej. W ostatnich latach daje się zauważyć wzrost zainteresowania stopami magnezu, które są uważane za innowacyjne tworzywa konstrukcyjne. Temat rozprawy doktorskiej jest zgodny z wytycznymi zawartymi w Regionalnej Strategii Innowacji Województwa Lubelskiego (dziedzina nr1: Innowacyjne technologie - nowoczesne technologie w przemyśle). Ponadto praca realizowana jest w ramach projektu kluczowego „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” Nr POIG.0101.02-00-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Przyjęcie wyników badań przez środowiska przemysłowe oraz późniejsze ich wdrożenie w procesach technologicznych może wpłynąć na wzrost konkurencyjności, poprawę kondycji finansowej oraz podniesienie poziomu innowacyjności przedsiębiorstw. Ponadto uważa się, że przemysł lotniczy jest jednym z głównych „inkubatorów” nowoczesnych technologii.

Rozprawa doktorska została podzielona na pięć rozdziałów. Pierwszy z nich zawiera przegląd aktualnego stanu wiedzy na temat stopów magnezu, ich właściwości, otrzymywania oraz uwarunkowań dotyczących obróbki. W drugim rozdziale zawarto temat, cel, hipotezy badawcze oraz zakres pracy. Zaproponowano również szczegółowy plan badań. W trzecim rozdziale przedstawiono program oraz metodykę badań, omówiono stosowaną aparaturę badawczą, a także podstawy statystycznej oceny wyników pomiarów. Rozdział czwarty zawiera wyniki oraz opis badań, a także analizę otrzymanych wyników. Ostatni rozdział obejmuje dyskusję otrzymanych wyników badań, rezultaty poznawcze, użytkowe oraz wnioski końcowe.

2. MAGNEZ, STOPY MAGNEZU ORAZ ICH ZASTOSOWANIE

Magnez jest jednym z najpospolitszych pierwiastków. Pochodzenie nazwy pierwiastka pochodzi prawdopodobnie od miasta w Azji Mniejszej „Magnesia”. Pierwszym, który zaczął badać związki magnezu był szkocki fizyk i chemik Joseph Black (1728–1799). Określił on różnice między węglanem wapnia oraz magnezu. W 1808r. brytyjski chemik Davy Humphrey (1778–1829) zidentyfikował magnez i to jemu przypisuje się odkrycie tego pierwiastka. Na skalę techniczną, a następnie przemysłową rozpoczęto produkcję magnezu odpowiednio: we Francji w 1857 r. (w tzw. procesie Deville-Caron) oraz w 1940 r. w Kanadzie. Jako pierwszy polską nazwę „magnez” zaproponował Filip Walter (1810-1847) [17, 55].

2.1. Wprowadzenie, otrzymywanie magnezu

Magnez to jeden z najpopularniejszych pierwiastków występujących w skorupie ziemskiej (w ilości 2,74%). Występuje on pod postacią takich minerałów jak [55]: dolomit, magnezyt, kizeryt, oliwin, enstatyt, serpentyn, karnalit. Woda morska zawiera ok. $1,3 \text{ kg/m}^3$ (tj. ok. 0,3%) magnezu.

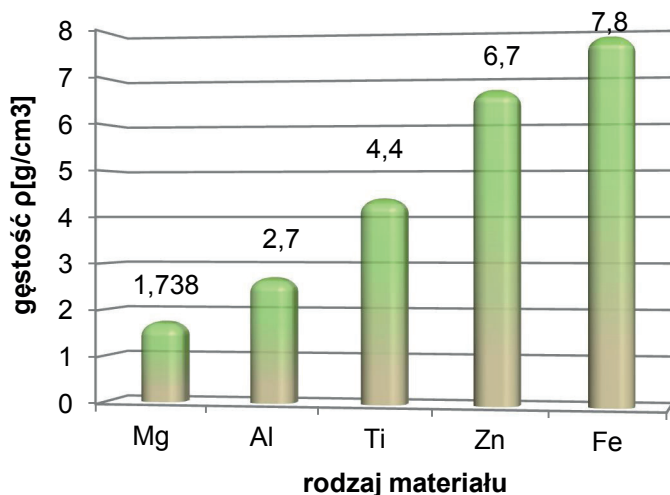
Obecnie do produkcji magnezu wykorzystuje się w zasadzie metody [55] oparte na redukcji (procesy silikotermiczne), poprzez redukcję tlenku magnezu żelazokrzemem otrzymywanym z rud węglanowych oraz elektrolizie (procesy elektrolityczne), poprzez elektrolizę stopionego bezwodnego chlorku magnezu otrzymywanego z:

- magnezytu, wody morskiej lub solanki,
- serpentynitu,
- karnalitu.

2.2. Właściwości magnezu, jego stopów oraz zastosowanie

Magnez ze względu na gęstość $\rho=1,738 \text{ g/cm}^3$ należy do grupy tzw. metali lekkich. Magnez jest ciałem stałym (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 $c=0,521 \text{ nm}$ (stosunek parametrów c/a wynosi 1,62 i odpowiada najściślejszemu ułożeniu atomów w sieci). W temperaturze powyżej 500°C , w stanie rozdrobnionym, małe frakcje wiórów, opiłki magnezu lub jego stopów mogą się zapalić, a w temperaturze 623°C magnez w postaci rozdrobnionej (najczęściej pył magnezowy) zapala się w powietrzu (temperatura zapłonu niższa od temperatury topnienia).

Temperatura topnienia magnezu wynosi 650°C , temperatura wrzenia 1107°C , a temperatura spalania powyżej 2000°C [16, 53, 54, 55, 91, 105]. Magnez jest o ok. 35% lżejszy od aluminium. Porównawczo gęstości różnych materiałów konstrukcyjnych podano na rys. 1.1. Stopy magnezu mogą być interesującym materiałem konstrukcyjnym, alternatywnym chociażby dla stopów aluminium [57].



Rys. 1. 1. Porównanie masy właściwej różnych materiałów konstrukcyjnych [91]

W tabeli 1.1 podano podstawowe właściwości czystego magnezu. Właściwości fizyczne oraz mechaniczne takie jak: gęstość, ciepło właściwe, wytrzymałość na rozciąganie, umowna granica plastyczności, twardość oraz wydłużenie podano w warunkach temperatury pokojowej.

W stanie czystym magnez jest rzadko stosowany. Jest jednak wartościowym składnikiem oraz odtleniaczem i modyfikatorem stopów metali. Czysty magnez (99,8%) dostarczany jest w postaci wlewków i gasek do dalszego przerabiania (głównie jako odlewy), także proszki, druty oraz taśmy (walcowane lub wyciskane) [16, 55]. Stopy magnezu zawierają zwykle co najmniej 90% magnezu. Produkowane są z metalu podstawowego lub rafinowanego poddanego recyklingowi [91]. Przykładowo stop AZ91 zawiera masowo 89,587% czystego Mg, a stop AZ31 95,31%. Właściwości wytrzymałościowe i plastyczne czystego magnezu są stosunkowo niskie i zależą od jego czystości. Właściwości mechaniczne można jednak poprawić przez wprowadzenie dodatków stopowych.

Tab. 1. 1. Podstawowe właściwości fizyczne i chemiczne magnezu [16, 55]

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	μm/(m·°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
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

Stopy magnezu są coraz częściej stosowane w konstrukcjach lekkich, zwłaszcza w przemyśle lotniczym. Obniżenie masy w środkach transportu przynosi oszczędności w kosztach eksploatacji (głównie mniejsze zużycie paliwa). 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. Ponadto ważną cechą magnezu oraz jego stopów jest dobra osłona elektromagnetyczna, oraz niski współczynnik tarcia ($\mu=0,1$). Nowoczesne stopy magnezu posiadają również dość dobrą odporność korozyjną, która może być jeszcze podwyższona poprzez zastosowanie odpowiedniej obróbki powłokowej, np. poprzez natrysk lub galwanizację powłok z zawartością chromu. Stosowane w [95] metody zabezpieczenia powierzchni odlewów magnezowych obejmują: metody techniczne (chromianowanie, pasywację/powłokę konwersyjną cyrkonową, lakierowanie oraz kataforezę) oraz metody dekoracyjne (pokrycia proszkowe, farba mokra oraz metalizacja próżniowa). Do podstawowych metod ochrony stopów magnezu przed korozją [92] zaliczyć należy konwersję chemiczną oraz anodowanie. Do nowoczesnych metod zabezpieczania powierzchni zaliczyć możemy takie metody jak Tagnite oraz Keronite. Podane metody należą do tzw. metod elektrolitycznych (np. anodowanie), pozwalających na wytworzenie ochronnej warstwy tlenków. Dodatkowo w przypadku metody Keronite, elektrolityczne utlenianie prowadzone jest w płazmie (*PEO - Plasma Electrolytic Oxidation*) [11, 113]. Ponadto, stopy magnezu wykazują brak agresywności w odniesieniu do materiału formy i niewielkie ciepło topnienia. Wysoka zdolność do tłumienia drgań oraz niska bezwładność elementów wytwarzanych ze stopów magnezu, umożliwiają zastosowanie stopów magnezu na szybko poruszające się elementy w miejscach, gdzie pojawiają się gwałtowne zmiany prędkości. Na uwagę zasługuje również, w porównaniu do tworzyw polimerowych, możliwość ich pełnego recyklingu. Dlatego też, odlewy ze stopów magnezu są konkurencyjne

dla części z tworzyw polimerowych i mogą być ich dobrym zamiennikiem [17, 24, 55, 59, 91].

Dla przykładu właściwości mechaniczne odlewniczego stopu AZ91 można w istotny sposób kształtować poprzez zastosowanie odpowiedniej obróbki cieplnej (T4 – przesycanie, T5 – starzenie, T6 – przesycanie i starzenie). Najwyższą wytrzymałością, a przy tym dobrą plastycznością, charakteryzował się stop w stanie T6 [63]. 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 AZ91, stosuje się specjalną obróbkę cieplną A-T4 (przesycanie zapobiegające rozrostowi ziarna) [64].

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 ($3\div 11\%$), cynk oraz mangan. Rzadziej stosuje się krzem, cyrkon i metale ziem rzadkich (RE – *Rare Earth*). 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) [12, 16, 20, 40, 48, 49, 55].

Aluminium jest najczęściej stosowanym dodatkiem stopowym w stopach Mg. 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 również, 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 [16, 17, 55, 59].

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 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 albo jako tzw. „mischmetal” albo jako „dydym”. „Mischmetal” 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 [17, 55, 59, 78].

Wieloskładnikowe stopy Mg zawierające (3÷10)% Al, (1÷3)% Zn oraz dodatek Mn, nazywane *elektronami*, są stosowane zarówno na elementy odlewane, jak i w postaci obrobionej plastycznie, przeważnie na gorąco [16]. 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 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 [17, 53, 54, 59].

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, co jest związane z ograniczoną plastycznością stopów magnezu [90].

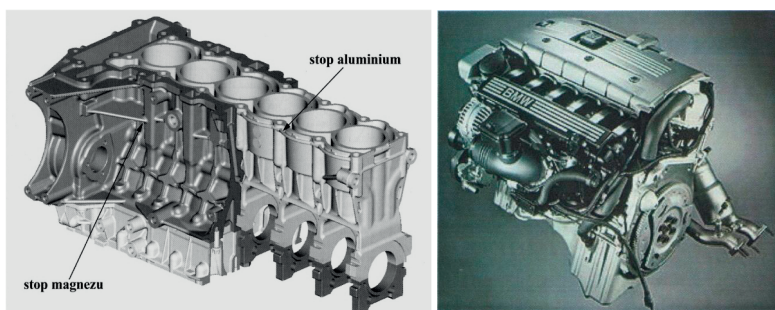
W tabeli 1.2 podano skład chemiczny oraz podstawowe właściwości typowych stopów magnezu stosowanych na elementy śmigłowców/samolotów w przemyśle światowym.

Tab. 1. 2. Skład chemiczny oraz właściwości stopów magnezu [82, 118]

Gatunek stopu Mg	Skład chemiczny [%]							
	Cu	Mn	Mg	Zn	Si	Fe	Al	inne
AZ31	0,05	0,2–0,1	reszta	0,7–1,3	–	–	2,5–3,5	Ca 0,04
AZ91HP	0,016	0,17		0,72	0,03	0,002	9,45	Ni 0,025
Właściwości stopów Mg	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	E [GPa]		A10 [%]	HB	ρ [g/cm ³]	
AZ31	280	–	ok. 45 GPa		–	–	1,77	
AZ91HP	200–240	150–170	ok. 45 GPa		0,5–3	65–85	1,8	

Takie gałęzie przemysłu jak: transport, przemysł lotniczy, kosmonautyka, aparatura automatyczna i robotyka, a zwłaszcza przemysł motoryzacyjny

wykazują coraz szersze zainteresowanie stopami magnezu [6, 9, 21, 29, 38, 59]. 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 [25, 56]. Stopy magnezu znajdują również zastosowanie w innych gałęziach przemysłu. Doskonałymi przykładami mogą być np. „laptopy”, telefony komórkowe, drobny sprzęt AGD, maszyny biurowe, elementy wyposażenia wnętrza aut. Dąży się do tego, aby maksymalnie zminimalizować czas potrzebny do wdrożenia nowych koncepcji np. dla obudowy telefonów komórkowych wykonywanych z blachy AZ31. Zastosowanie znajdują tu zintegrowane systemy wytwarzania [44]. 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) [75]. 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 [11, 20, 27, 38, 71]. W budowie silników stopy te wykorzystuje się na korbowody silników samochodów sportowych, do wytwarzania kadłubów, także obudowy skrzyń biegów [27]. 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 stopów Mg-Ca, przyniosły bardzo atrakcyjne rezultaty. Stopy te nie generują żadnych toksycznych, rakotwórczych czy mutagennych produktów, więc mogą być stosowane z fizjologicznego punktu widzenia [15, 24, 65].



Rys. 1. 2. Kadłub silnika BMW 3.0 wykonany ze stopu Al. oraz stopu Mg [27, 38]

Na rys. 1.2 przedstawiono przykładowe rozwiązanie bloku silnika samochodu osobowego z zastosowaniem stopu magnezu, jako materiału konstrukcyjnego.

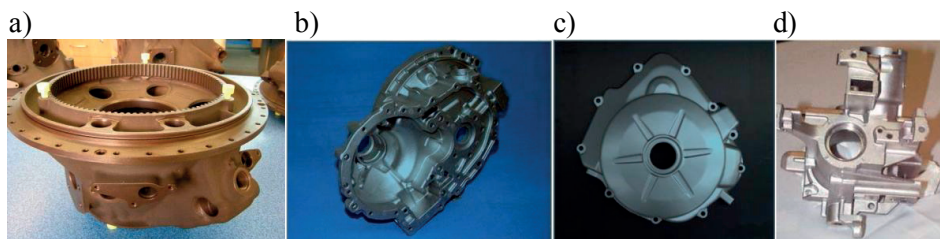
2.2.1. Odlewnicze stopy magnezu

Ze względu na skład chemiczny można wyróżnić kilka podstawowych grup stopów, które są obecnie produkowane w celach komercyjnych, 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 na 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 odkształcenia, 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 możliwe do eksploatacji w podwyższonej temperaturze (powyżej 300°C). Dodatki stopowe takie jak metale ziem rzadkich (RE – *Rare Earth*) i skand (Sc) są stosunkowo drogie, co w pewnym stopniu ogranicza ich zastosowanie. Przemysł kosmiczny, lotniczy, a także jądrowy, wymagający od nich najlepszych właściwości, 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 pełzanie 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 mieszanie 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 [2, 17, 55].



Rys. 1. 3. Typowe zastosowania odlewniczych stopów magnezu wykonywanych na potrzeby przemysłu lotniczego: obudowy a) przekładni, b) sprzęgła, oraz motoryzacyjnego: c) część motocyklowa po powlekanii proszkowym, d) obudowa przekładni kierowniczej [16, 92]

Na rys. 1.3 przedstawiono przykłady zastosowania odlewniczych stopów magnezu. Stopy magnezu odlewane ciśnieniowo są stosowane na przekładnie silników samochodowych, coraz powszechniej stanowią substytut odlewów ciśnieniowych aluminiowych, np. na bloki silników spalinowych, obudowy przekładni biegów oraz na elementy karoserii [59].

2.2.2. Stopy magnezu do obróbki plastycznej

Stopy magnezu z grupy stopów przeznaczonych do obróbki plastycznej poddawane są również często obróbce frezowaniem. Przykłady takich elementów przedstawiono na rys. 1.4.



Rys. 1. 4. Panel kokpitu sterowania małego samolotu pasażerskiego oraz obudowa skrzyni biegów śmigłowca (stop AZ31B) [97]

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 [25]:

- 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 tej grupy ograniczają jego zastosowanie, jako materiału obrabianego 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 do obróbki plastycznej są stosowane sporadycznie, co wynika również z trudności technologicznych przy obróbce 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 tej grupy to AZ31, AZ61 oraz AZ80. Zastosowanie stopu AZ31 ogranicza się do części eksploatowanych 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: kształtownalność ubytkowa, szczelność oraz brak odkształceń elementów wytwarzanych [21, 25, 55].

2.2.3. Stopy magnezu wytwarzane szybkim krzepnięciem

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 wydzielania 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 mechanicznie mielone na proszki, które następnie umieszczone w specjalnym metalowym pojemniku są wyciskane w celu wytworzenia prętów [16, 55, 78].

2.3. Metody kształtowania stopów magnezu

Do podstawowych metod kształtowania stopów magnezu należy zaliczyć [18, 21, 55]: kształtowanie formujące (odlewanie ciągłe i kształtowe), kształtowanie plastyczne (poprzez walcowanie, kucie, wyciskanie, kształtowanie blach oraz kształtowanie nadplastyczne) oraz kształtowanie ubytkowe (poprzez toczenie i wytaczanie, frezowanie, wiercenie i rozwiercanie, gwintowanie, szlifowanie). W ostatnich latach nowego znaczenia nabrała spawalność [2], zwłaszcza odlewniczych stopów magnezu, jako metoda regeneracji odlewów po ich zużyciu eksploatacyjnym lub w celu naprawy wad odlewniczych.

2.4. Ocena skrawalności stopów magnezu

Łączny udział obróbki skrawaniem w przemyśle maszynowym jest obecnie oceniany na ok. 50%. Wynika to ze wzrastających możliwości zastosowania skrawania, uzyskiwanych dokładności wymiarowo-kształtowych, jakości powierzchni, wydajności oraz efektywności wytwarzania [23]. Największe znaczenie, z punktu widzenia obróbki skrawaniem, ze względu na charakter półwyrobów ze stopów magnezu, przeznaczenie oraz zastosowanie ma obróbka frezowaniem. Znaczna większość elementów wykonywanych ze stopów magnezu na potrzeby przemysłu lotniczego poddawana jest jedynie obróbce frezowaniem. Zarówno półfabrykaty odlewane jak i wytwarzane poprzez

obróbkę plastyczną (porównaj rys. 1.3 oraz 1.4) ze względu na swoją konstrukcję najczęściej kształtowane są poprzez frezowanie.

Jednym z nowszych sposobów prowadzenia obróbki zgrubnej jest tzw. frezowanie wgłębne, stosowane w celu szybkiego usunięcia materiału z przedmiotu obrabianego w procesach obróbki zgrubnej lub kształtującej. Podczas frezowania czołowego kluczowe są zagadnienia doboru odpowiedniej geometrii narzędzia oraz odpowiednich parametrów skrawania. Wyniki prowadzonych badań wykazują, że zarówno wydajność procesu frezowania czołowego jak i chropowatość obrabianych powierzchni, były wyższe od klasycznego frezowania frezami trzpieniowymi. Czasy maszynowe obróbki elementów z wykorzystaniem frezowania wgłębego mogą zostać zredukowane nawet o 60% w porównaniu ze strategiami obróbkowymi stosowanymi dotychczas, szczególnie, jeżeli wykorzystana zostanie w takim przypadku technologia HSM. Ma to wymierne korzyści ekonomiczne dla prowadzenia procesu technologicznego związane z bardziej optymalną eksploatacją obrabiarki, większą trwałością i niezawodnością narzędzi skrawających [66].

Już w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku, podawano zalecane parametry skrawania dla obróbki toczeniem, frezowaniem, wierceniem i rozwiercaniem oraz zalecane cechy geometryczne narzędzi ze stali szybko tnącej lub narzędzi składanych z płytkami z węglików spiekanych. Przykładowo, podczas frezowania tzw. głowicami „nożowymi” (głowice frezarskie starszej generacji) podawano [56], że prędkość skrawania może dochodzić do: dla frezowania zgrubnego 1000m/min, frezowania wykończeniowego 2700m/min. Ogólną zasadą doboru prędkości skrawania już w tam-tych latach było stosowanie takiej prędkości obrotowej, na jaką tylko pozwala charakterystyka maszyny technologicznej. Jedyną przesłanką do stosowania mniejszych prędkości skrawania jest to, że większe prędkości mogą prowadzić do dużych naprężeń własnych w warstwie wierzchniej przedmiotu obrabianego [55]. Jako ograniczenie można traktować również wielkość i kształt wiórów powstających w określonych warunkach technologicznych [104]. Należy dążyć do tego, aby powstające wióry były jak największe oraz, aby nie zachodziło fragmentowanie wiórów.

Skrawalność rozumiana jest jako podatność materiału na obróbkę skrawaniem i oceniana jest za pomocą wskaźników skrawalności. Skrawalność to zespół cech materiału, ściśle zależnych od czynników środowiska obróbkowego, czyli m.in.: kinematyki procesu i sposobu jego realizacji, składu stopu i stanu struktury, warunków skrawania i geometrii narzędzia, materiału ostrza narzędzia, stanu technicznego i właściwości dynamicznych (sztywności) obrabiarki [23, 55].

Wskaźniki skrawalności mogą być definiowane na różne sposoby. Wg [84] wskaźniki te dzielimy na użytkowe oraz fizyczne. *Użytkowymi* wskaźnikami skrawalności są: trwałość ostrza narzędzia, chropowatość powierzchni obrobionej, 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 w [23], 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 oraz 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).

Krytycznym wskaźnikiem skrawalności stopów magnezu, definiującym bezpieczeństwo obróbki tych stopów jest temperatura w strefie skrawania. Podczas obróbki na sucho skłonność do samozapłonu wykazują wióry i pyły magnezowe. Niebezpieczeństwo samozapłonu zachodzi zwykle wskutek nadmiernego zużycia ostrza lub pojawienia się narostu, powoduje to nagły wzrost temperatury skrawania. Z tego względu podczas skrawania tych stopów należy zwracać szczególną uwagę na stan ostrza [49]. Podstawowe problemy występujące w obróbce stopów magnezu można podzielić ze względu na sposób prowadzonej obróbki [6, 26, 53, 54, 72, 76, 100, 104]: na sucho oraz na „mokro” z zastosowaniem chłodziw mieszalnych lub niemieszalnych z wodą. Podczas obróbki na sucho występuje ryzyko zapłonu wiórów, niedokładność kształtu i wymiarów na skutek odkształceń cieplnych oraz drgań podczas obróbki, gorsza jakość powierzchni obrobionej, zwłaszcza ze względu na adhezję oraz tworzenie narostu, zmniejszona trwałość narzędzi podczas skrawania stopów wzmocnionych oraz utrudnione usuwanie wiórów ze strefy obróbki. W przypadku cieczy smarująco-chłodzących mieszalnych z wodą (tzw. emulsji) utrudniony jest recykling zanieczyszczonych wiórów oraz tworzenie się wodoru (niebezpieczeństwo wybuchu). Stosując ciecze smarująco-chłodzące niemieszalne z wodą (oleje) oprócz wcześniej wymienionych problemów dochodzi jeszcze potrzeba czyszczenia elementów obrabianych oraz dostawanie się cząsteczek oleju do powietrza w formie aerozolu. Jak podano w [53] stosując ciecze niemieszalne z wodą (oleje), podczas skrawania z dużymi prędkościami może dochodzić do „wyfuknięcia” lub wybuchów mieszaniny powietrza i mgły olejowej w zamkniętej przestrzeni obrabiarki. Pożary oleju, o ile nie zostaną szybko ugaszone, mogą wywołać zapłon wiórów ze stopów magnezu. Do gaszenia pożarów stopów magnezu należy używać gaśnic typu D (gdzie podstawowym środkiem gaśniczym jest chlorek 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 $8 \div 15^{\circ}\text{C}$ i wilgotności $20 \div 60\%$ [93, 94, 98].

W zakresie obróbki na sucho oraz z minimalnym smarowaniem [96] wykonywane są próby usuwania wiórów podczas frezowania oraz wiercenia poprzez odsysanie wiórów przy krawędzi skrawającej narzędzia. Podczas skrawania stopów magnezu rozwiązanie takie ma pewne zalety:

- ograniczenie rozproszenia wiórów, które mogą spowodować przeniesienie ognia w inne miejsca,
- mniejsze zagrożenie wybuchem, które występuje w przypadku powstawania pyłu magnezowego (poniżej $500\mu\text{m}$),
- mniejsza ilość wiórów w strefie obróbki,
- mniejsze ryzyko uszkodzenia obrabiarki w razie wybuchu ognia,
- oddzielanie pyłu magnezowego przez separator odśrodkowy (eliminacja filtrów),
- możliwość prasowania pyłu na brykiet, co zajmuje znacznie mniej miejsca oraz mniejsza łatwopalność zbrykietowanego pyłu.

W przypadku stosowania cieczy mieszalnych z wodą (emulsji), przyczyną zagrożenia jest tworzenie się wodoru na obrobionych powierzchniach i wiórach. Wodór ma niską temperaturę zapłonu, więc wystarczy iskra, aby spowodować wybuch zgromadzonego gazu. Jeśli przy obróbce stopów magnezu z zastosowaniem emulsji dochodzi do pożaru, jest to skutek reakcji gorącego magnezu z wodą. Z tych powodów nie można dopuścić do koncentracji wodoru większej niż 4% objętości w przestrzeni roboczej obrabiarki, w strefie wyciągu wiórów oraz pojemnikach do składowania i transportu wiórów. Warto jednak zauważyć, że stopy magnezu nie reagują tak intensywnie jak czysty magnez, jednak nie należy zapominać, że przy obróbce stopów magnezu zawsze należy zachowywać odpowiednie procedury związane z ochroną ppoż.

Do obróbki frezowaniem stopów magnezu stosowane są następujące rodzaje materiałów narzędziowych: stal szybko tnąca (dla niewielkich partii produkcyjnych), drobnoziarniste węgliki spiekane (powlekane, np. warstwami TiAlN lub diamentowymi oraz niepowlekane) oraz polikrystaliczny diament (PKD). Ponadto narzędzia powinny charakteryzować się tzw. „ostrą geometrią” (kąt natarcia γ w zakresie $15 \div 25^{\circ}$, kąt przyłożenia α w zakresie $12 \div 20^{\circ}$, kąt wzniosu linii śrubowej λ_s $30 \div 40^{\circ}$). Ostrza PKD pozwalają na osiągnięcie bardzo wysokiej jakości powierzchni (zwłaszcza przy produkcji wielkoseryjnej). Poza tym narzędzia powinny charakteryzować się [35, 39, 55, 68, 98, 99, 104] dużą przestrzenią rowków wiórowych, zapewniającą dobre odprowadzanie wiórów (2 lub 3 ostrza), polerowanymi powierzchniami natarcia i przyłożenia. Zreduko-

wana liczba ostrzy pozwala na uzyskanie większych rowków wiórowych oraz możliwość intensywniejszej obróbki. Powoduje to wydzielanie się mniejszej ilości ciepła tarcia, pozwala na stosowanie większych prędkości skrawania, mniejszych odkształceń, obniżonego zużycia energii oraz lepszej jakości 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. Dlatego kluczowym rozwiązaniem ekonomicznej i racjonalnej obróbki elementów dla przemysłu lotniczego jest prawidłowy dobór narzędzi [69].

Skrawanie stopów magnezu z wykorzystaniem wysokich prędkości skrawania oraz narzędzi PKD umożliwia uzyskanie jakości powierzchni porównywalnej z procesem szlifowania wykończeniowego. Użycie narzędzi o małych średnicach (np. frezów trzpieniowych lub wiertel) powoduje ograniczenie prędkości skrawania, na skutek określonej charakterystyki wrzeciona obrabiarki (maksymalna prędkość obrotowa). Z kolei dla narzędzi z dużymi średnicami, granicznym kryterium jest maksymalna dopuszczalna prędkość obrotowa narzędzia. Przy obróbce wykończeniowej sztywność narzędzia jest związana z przekrojem poprzecznym warstwy skrawanej oraz objętością materiału usuwanego w jednostce czasu [55].

Bardzo dobra kształtowalność ubytkowa stopów magnezu [29, 55, 76, 91, 95, 101, 104] sprawia, że wyroby z tych stopów można produkować 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. Stopy magnezu można obrabiać na sucho, ze względu na małą pojemność cieplną, zatem nawet przy dużych wartościach technologicznych parametrów obróbki skrawaniem elementy obrabiane nie nagrzewają się gwałtownie. Ma to również wpływ na trwałość, żywotność narzędzi do obróbki, które w przypadku stopów magnezu można używać 5–10 razy dłużej, niż jest to możliwe przy obróbce stopów aluminium (jeśli w stopach nie występują cząstki powodujące ścieranie, np. Si), ze względu na małe obciążenie mechaniczne oraz cieplne narzędzi. Bardzo dobra skrawalność jest również związana z:

- wymaganą mniejszą energią skrawania (ze względu na niewielkie siły skrawania),
- dużą efektywnością obróbki (oprócz dużych prędkości skrawania, również duże prędkości posuwu i głębokości skrawania),
- tworzeniem wiórów głównie segmentowych i odpryskowych, wysoką jakością powierzchni obrobionej (bez konieczności stosowania operacji wykończeniowych),
- możliwością prowadzenia obróbki na sucho jak i z zastosowaniem metody MQL (*Minimum Quantity Lubrication*), zwanej również metodą

minimalnego smarowania (MMS) oraz z zastosowaniem dedykowanych cieczy smarująco-chłodzących (np. Estramet 575MG lub Trim E805).

Stosowanie wydajnej i efektywnej obróbki skrawaniem podyktowane jest również możliwością skrócenia czasu maszynowego, wzrostem wydajności, a więc generowaniem oszczędności w procesie wytwórczym (spadek kosztów wytwarzania). Wytwarzanie elementów lotniczych, związane jest z usuwaniem dużej ilości materiału obrabianego – wymaga to długotrwałej obróbki. Zastosowanie takich metod obróbki jak HSM, HPC czy też HSC pozwala na znaczne skrócenie czasu obróbki. Charakterystyczne jest również to, że frezowanie jest z reguły obróbką zgrubną i wykończeniową dla takich elementów. Szczególnie ważne jest więc kształtowanie odpowiednio małej chropowatości powierzchni [36, 37, 100].

Obróbka HSM definiowana jest, jako wysokowydajna metoda skrawania, która pozwala na uzyskanie wysokiej jakości powierzchni, gdzie chropowatość powierzchni obrobionej $Ra \leq 1 \mu m$ [3, 4, 82]. Zwiększone prędkości skrawania prowadzą również do zwiększenia prędkości posuwu obróbki, co wpływa na zmniejszenie czasu głównego, a więc zwiększenie wydajności objętościowej skrawania [85, 102]. Czas obróbki, w przypadku tej metody, jest znacznie krótszy niż przy obróbce konwencjonalnej. Dodatkowe korzyści [35], wynikające z obróbki szybkościowej to ograniczenie tworzenia się zadziórów, lepsze odprowadzanie wióra, zwiększona stabilność procesu, uproszczone oprzyrządowanie oraz niewielkie siły skrawania. Efektywna obróbka na sucho, jest bardziej ekonomiczna, a dodatkowo eliminowane są ciecze smarująco-chłodzące (aspekt ekologiczny, ochrona środowiska). Jednak, gdy temperatura w strefie skrawania staje się bliska temperatury topnienia zachodzi ryzyko zapłonu. Z tego względu szczególnie ważne oraz przydatne stają się pomiary temperatury wiórów w strefie skrawania.

Z kolei obróbka wysokowydajna, czy wysoko produktywna to m.in. obróbka HPM (ang. High Performance Machining) lub HPC (ang. High Performance Cutting). HPC to proces, w którym dąży się do optymalnego wykorzystania mocy wrzeciona obrabiarki w celu usunięcia maksymalnej objętości materiału w jednostce czasu. Wzrost wydajności objętościowej uzyskuje się dzięki większym prędkościom skrawania v_c , ale przy równocześnie większych posuwach. Przyjmuje się, że HPC jest techniką właściwą dla obróbki wstępnej lub kształtującej, podczas gdy HSC (ang. High Speed Cutting) jest traktowana, jako obróbka wykończeniowa [23].

W procesie obróbki szybkościowej zostaje zminimalizowana deformacja wióra i jego zgniot, 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 [85].

Podstawowymi trudnościami występującymi w obróbce stopów magnezu na sucho (głównie podczas toczenia, gdy droga skrawania przekracza ok. 350m) są

intensywne tworzenia narostu (FBU – Flank Built Up), wskutek oddziaływania adhezyjnego, powyżej pewnej krytycznej prędkości skrawania (dla toczenia $v_c > 900 \text{ m/min}$) oraz ryzyko zapłonu małych cząstek i wiórów, gdy temperatura skrawania przewyższa temperaturę topnienia. Adhezja oraz zjawisko tworzenia narostu zachodzą w przypadku stosowania narzędzi węglkowych bez powłoki lub z powłoką TiN. Aby ograniczyć to niekorzystne zjawisko, należy stosować narzędzia z ostrzem PKD. Powstawanie narostu należy tłumaczyć tribochemicznymi reakcjami pomiędzy składnikami materiałów ostrza i kształtowanego przedmiotu, które występują dopiero po osiągnięciu temperatury topnienia faz międzymetalicznych Mg-Al obrabianego materiału (dla $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ – $t_E = 437^\circ\text{C}$). Ze względu na wyraźnie wyższą przewodność cieplną i korzystne właściwości tribologiczne diamentu można uniknąć topienia fazy w przypadku stosowania narzędzi z ostrzami PKD. Ze względu na mniejsze siły skrawania występujące podczas procesu obróbkowego dokonywanego narzędziami z ostrzami diamentowymi obserwuje się, zwłaszcza przy małych przekrojach warstwy skrawanej, znacząco niższe temperatury [6, 14, 23, 24, 53, 72, 73, 74]. Obrabiarki, do obróbki stopów Mg powinny posiadać dodatkowe instalacje gaśnicze. Obrabiając stopy magnezu, należy pamiętać o skłonności do powstawania pyłu magnezowego. Pył ten jest szkodliwy dla zdrowia obsługujących oraz wpływa niekorzystnie na trwałość przewodnic i łożysk. Należy więc stosować obrabiarki z tzw. „zakrytymi” przewodnicami [82]. Przy niskiej prędkości skrawania (w przypadku toczenia do 900 m/min) powłoka narzędziowa wpływa na redukcję sił skrawania, zmniejsza to temperaturę w strefie skrawania oraz abrazyjne (ściernie) zużycie narzędzia [14]. Dla wyższych prędkości skrawania, narzędziowa warstwa ochronna zaczyna pełnić funkcję bariery dla dyfuzji na granicy wiór-narzędzie. Dlatego zmniejsza się zużycie narzędzi, a okres trwałości wzrasta. Aby zredukować występowanie narostu należy stosować narzędzia z odpowiednimi kątami przyłożenia, powłoki narzędziowe oraz ciecze chłodząco-smarujące [6]. Podczas frezowania głowicą frezarską z ostrzami PKD, obserwuje się zjawisko adhezji na powierzchni przyłożenia już przy prędkości 2000 m/min . Narost obserwowano przy bardzo wysokiej prędkości skrawania 2800 m/min , zdeformowany materiał wykazywał właściwości stopionego materiału. Narost można łatwo usunąć z ostrza narzędzia przy pomocy acetonu. Zaleca się stosować mniejszą liczbę ostrzy, ze względu na tzw. „zaklejanie” powierzchni obrobionej przez narost znajdujący się na sąsiednich ostrzach płytek skrawających. Liczba ostrzy narzędzi frezarskich powinna być o połowę lub jedną trzecią mniejsza w porównaniu do narzędzi zalecanych np. do obróbki stali [8, 24].

Podstawowym wskaźnikiem skrawalności wszystkich metali konstrukcyjnych jest jakość powierzchni obrobionej. Chropowatość powierzchni po obróbce frezowaniem jest zależna m.in. od rodzaju materiału narzędziowego oraz geometrii narzędzia. Podczas obróbki na sucho głowicą

frezarską z ostrzami PKD [24] największy wpływ na zmianę parametru R_a miał posuw – nastąpił wzrost parametru R_a (w przybliżeniu liniowy) wraz ze wzrostem posuwu na ostrze. Podczas zmiany prędkości oraz głębokości skrawania nie obserwowano ich jednoznacznego wpływu na jakość powierzchni obrabianej. Podczas frezowania z zastosowaniem oleju, głowicą frezarską z ostrzami PKD, parametry chropowatości wyniosły [53]: R_z ($4 \div 12$) μm natomiast $R_a < 2 \mu\text{m}$, przy zmienności posuwu ($0,1 \div 0,6$) mm/ostrze. Podczas frezowania stopu AZ31B [32] z chłodzeniem strefy styku sprężonym powietrzem, zaobserwowano że chropowatość wzrasta wraz ze wzrostem posuwu i liczby ostrzy, a pozostaje prawie bez zmian w zakresie v_c ($116 \div 311$) m/min. Dlatego zaleca się redukcję liczby ostrzy do minimum.

Ze względu na odkształcenia generowane podczas obróbki istotna staje się również analiza sił skrawania. Siły skrawania powodują odkształcenia obrabianych części maszyn. Dodatkowo wzrost sił powoduje zwiększanie tzw. odkształconej grubości wióra. Gdy nieodkształcona grubość wióra zmniejsza się, zmniejsza się również kąt ścinania, co powoduje, że temperatura w płaszczyźnie ścinania zmienia się (wzrasta). Można to wyjaśnić używając pojęcia właściwej siły skrawania (właściwa siła skrawania, jest to stosunek siły skrawania do przekroju poprzecznego wióra). Gdy zmniejszamy nieodkształconą grubość wióra, siła skrawania zwiększa się. Energia ścinania na jednostkę objętości, zwiększa ilość usuwanego metalu wraz ze wzrostem siły skrawania, co powoduje wzrost temperatury skrawania w płaszczyźnie ścinania [19, 81]. Również adhezja i zjawisko narostu mogą powodować silne wahania sił skrawania oraz wywoływać obniżenie jakości powierzchni i dokładności wymiarowo-kształtowej. Podczas frezowania głowicą z ostrzami PKD, stopu AZ91HP z chłodzeniem za pomocą oleju, siły skrawania przyjmują małe wartości i narastają liniowo wraz ze zwiększaniem posuwu [53].

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) [85].

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 [3, 4]:

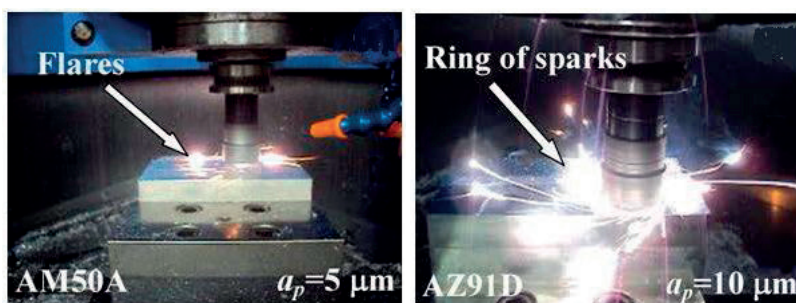
- $\partial F / \partial v_c < 0$, w przypadku HSM,
- $\partial F / \partial v_c > 0$, w przypadku obróbki konwencjonalnej.

Temperatura w strefie skrawania jest bardzo ważnym zagadnieniem z punktu widzenia bezpieczeństwa obróbki stopów magnezu. Temperatura, generowana podczas obróbki, może spowodować zapłon wióra. Maksymalna wartość temperatury w strefie skrawania, przy obróbce stopów magnezu, dotyczy obszaru formowania wióra oraz czasu jego formowania. Proces deformacji skoncentrowany jest w bardzo małym obszarze strefy skrawania. Generowanie

temperatury w strefie skrawania związane jest ściśle z czasem formowania się wióra, gdyż w późniejszym etapie frezowania nie następuje już wzrost temperatury formowanego wióra. Podczas skrawania, np. w próbach toczenia analizie temperatury poddaje się niewielki obszar nad powierzchnią natarcia narzędzia (w odległości $40\mu\text{m}$ od powierzchni natarcia). Opisany w pracy [1] sposób pomiaru z użyciem kamery termowizyjnej Flir SC3000 pozwala ponadto na analizę rozkładu temperatury wzdłuż krawędzi skrawającej oraz wióra, co z kolei jest niemożliwe w przypadku stosowania termopar (pomiar średniej temperatury). Podczas toczenia [33], oprócz wykorzystania kamery termowizyjnej, można mierzyć temperaturę, wykorzystując termopary obce, umieszczone w przedmiocie obrabianym. Jednak i w tym przypadku, metoda z użyciem termopar obcych, może służyć jako metoda porównawcza, gdyż mierzona jest temperatura w pewnej odległości od strefy styku narzędzia z przedmiotem obrabianym [58]. Wartości pomiaru temperatury są zbliżone do tych obserwowanych w przypadku zastosowania pirometrii optycznej. Również podczas operacji frezarskich [52], wykonywanych na stopie AZ91HP z zastosowaniem metody MQL, stosowano pomiar temperatury wiórów przy użyciu kamery termowizyjnej. Maksymalna zaobserwowana wartość temperatury wyniosła ok. 290°C . Jest to wartość znacznie niższa od temperatury topnienia stopów magnezu lub temperatury, w której drobne cząstki (wióry) mogą ulec zapłonowi (ok. 500°C). Proponowana metoda pomiaru temperatury zawarta w [19] pozwala na pomiar tzw. „średniej temperatury powierzchni przyłożenia narzędzia”. 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” (głębokość skrawania) jest raczej niewielka, porównywalna z promieniem zaokrąglenia krawędzi skrawającej. W omawianych badaniach zastosowano termopary typu k. Badaniom poddano stop AZ91. Z badań tych wynika, iż sposób montażu termopary w otworze ma bardzo istotne znaczenie. W pracy podano również wzór matematyczny na średnią temperaturę w płaszczyźnie ścinania. Maksymalna wartość zmierzonej temperatury wyniosła 302°C , przy prędkości skrawania $v_c=816\text{m/min}$ i przy „nieodkształconej grubości wióra” $9\mu\text{m}$, więc jest to temperatura zdecydowanie niższa od temperatury topnienia stopów magnezu. Do obserwacji nadtopień użyto skaningowej mikroskopii elektronowej SEM. Nie znaleziono nadtopień na obserwowanych wiórach ze stopu magnezu AZ91. Również wg [98] temperatura skrawania wzrasta wraz ze zmniejszaniem się „nieodkształconej grubości wióra” oraz wzrostem prędkości skrawania. Na ewentualne niebezpieczeństwo zapłonu podczas obróbki ma wpływ wielkość wióra, co jest związane bezpośrednio z jego masą. Ze względu na niebezpieczeństwo zapłonu [104] wióry magnezowe powinny być jak największe. Interesującym zagadnieniem są również próby obliczenia wartości temperatury wióra w wyznaczonych punktach powierzchni ścinania, przedstawione

w postaci zależności matematycznych. Jako efekt końcowy podano wykres zależności wartości temperatury wióra od prędkości skrawania [50].

Ze względów bezpieczeństwa, podczas obróbki na sucho stopów magnezu, istotnym wskaźnikiem jest również temperatura zapłonu wiórów ze stopów Mg. Obserwowano zapłon podczas frezowania stopów magnezu (AM50A, AZ91D) w warunkach bardzo małej głębokości skrawania a_p , w granicach od kilku do kilkuset μm . Podczas takich prób skrawania obserwowano rozbłyski, flary, iskry oraz pierścienie rozbłysków (ciągłe rozbłyski), co przedstawiono na rys. 1.5 [6, 26, 87]. W podanych warunkach skrawania powstają wióry sproszkowane, rurowo-śrubowe, igłowo-śrubowe oraz długie-taśmowe. Wióry sproszkowane oraz igłowo-śrubowe mogą powodować powstawanie flar i ciągłych rozbłysków. Mają one cieńsze grubości płytek ($2\div 3\mu\text{m}$) w porównaniu do grubości wiórów rurowo-śrubowych oraz długich taśmowych (więcej niż $10\mu\text{m}$). Należy unikać sproszkowanych oraz igłowo-śrubowych wiórów, podczas szybkościowego frezowania stopu Mg AM50A. Zastosowanych głębokości skrawania nie spotyka się na ogół w praktyce przemysłu maszynowego.



Rys. 1. 5. Zapłon wiórów ze stopów magnezu AM50A oraz AZ91D podczas frezowania [6, 26]

Na rodzaj powstających wiórów (a przez to również rodzaj zapłonu) mają wpływ: prędkość skrawania, głębokość skrawania oraz gatunek stopu magnezu (skład chemiczny stopu). Ponadto powstawanie iskier (w przypadku stopów z serii AM50) ma miejsce przy większej głębokości oraz mniejszej prędkości skrawania. Zmiana rodzaju zapłonu od iskry do flary (w przypadku stopów serii AZ91) ma miejsce przy wyższej wartości, zarówno głębokości jak i prędkości skrawania. Zapłon wiórów jest utrudniony wraz ze wzrostem zawartości Al, szczególnie połączonym ze wzrostem małych głębokości skrawania oraz wyższymi prędkościami skrawania. W uwagi na fakt, że przy danej głębokości skrawania oraz zmianach prędkości skrawania i posuwu, powstawanie iskier czy flar (a więc zapłonu wiórów), ma miejsce przy niższych prędkościach skrawania oraz posuwu, więc poprzez zmianę tychże parametrów można wpływać na ryzyko zapłonu [6, 55].

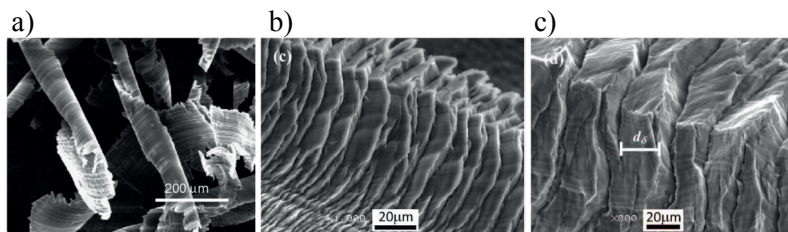
Skutecznym sposobem zmniejszenia ryzyka zapłonu jest odsysanie wiórów ze strefy obróbki. Powstający przy odsysaniu prąd powietrza chłodzi strefę skrawania, czemu podczas frezowania sprzyja nieciągły styk ostrza z materiałem obrabianym. Krótkie i cienkie wióry, które przejmują znaczną część ciepła skrawania, zostają szybko usunięte. Suche wióry nie skleją się i dają się lepiej odprowadzać. Minimalne smarowanie (MQL, MMS) znajduje więc zastosowanie głównie wtedy, gdy ze względu na charakter procesu, występuje ciągły styk narzędzia z materiałem obrabianym (toczenie, wiercenie) [55, 10]. Możliwy jest recykling wiórów, zanieczyszczonych olejem poprzez ich fuzję z argonem. Najlepszą jakość materiału otrzymanego z recyklingu wiórów uzyskano dla metody RM (re-melt), czyli metody ponownego przetapiania [47]. Wióry zanieczyszczone olejem na poziomie powyżej 5% nie nadają się do recyklingu ze względu na koszty. Od $(0,5 \div 5)\%$ zanieczyszczenia olejem, recykling wiórów jest możliwy ale zbyt drogi. Przy zanieczyszczeniu na poziomie mniejszym od 0,5% oleju w wiórach, recykling jest opłacalny, uzyskuje się ok. 95% użytecznego surowca [52].

Interesującym parametrem, związanym z bezpieczeństwem obróbki jest tzw. punkt zapłonu danego gatunku stopu magnezu. W badaniach [45] analizuje się m.in. wpływ ceru (Ce) i aluminium (Al) na punkt zapłonu i odporność na utlenianie stopu magnezu. Maksymalne temperatury zapłonu wyniosły odpowiednio 535°C dla stopu AM50 oraz 525°C dla stopu AZ91D, przy zawartości ceru (Ce) 0,25% masowo. Również w [88] badano wpływ dodatku ceru (Ce) oraz wpływ wielkości cząstek (wiórów) na punkt zapłonu stopu Mg AZ91D. Większy wpływ na punkt zapłonu wykazała zmiana zawartości ceru, w porównaniu do zmiany wielkości cząstek. Zawartość ceru (Ce) zmieniano w zakresie $(0,15 \div 0,45)\%$ masowo. Wielkość cząstek wyniosła $(58 \div 270)\mu\text{m}$. Najwyższą wartość temperatury zapłonu (punktu zapłonu) zaobserwowano dla zawartości 0,25% wagowo ceru, wyniosła ona ok. 525°C przy wielkości cząstek ok. $150\mu\text{m}$.

Z kolei wg [46] punkt zapłonu popularnych stopów magnezu WE43, AZ31 oraz AZ91 wynosi odpowiednio: 644°C dla stopu WE43, 628°C dla stopu AZ31 oraz 600°C dla stopu AZ91. Jednakże temperatura zapłonu zależy w znaczącym stopniu od szczegółów przeprowadzanego testu. W podanym przykładzie badano zapłon sześcienniej kostki o długości boku 15mm. Również w pracy [62], badano odporność na zapłon czystego Mg oraz jego stopów AZ91 i WE43. Odporność na zapłon (utlenianie) zależna jest m.in. od obecności itru (Y), który wpływa na tzw. punkt zapłonu. Badania zapłonu prowadzono na polerowanych próbkach sześciennych o długości boku 20mm. Odporność na zapłon zależy m.in. od geometrii próbki, duża powierzchnia próbki może ułatwiać zapłon. Próbkę ogrzewano indukcyjnie, pomiarów temperatury dokonano przy użyciu termoelementu. Dla stopu WE43 nie obserwowano zapłonu do 750°C. Dla

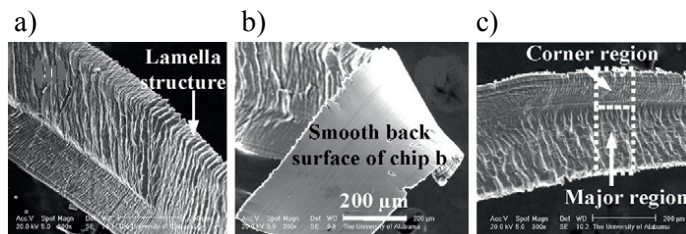
czystego Mg punkt zapłonu wyniósł ok. 630°C, natomiast dla AZ91 ok. (580÷590)°C.

Istotna z punktu widzenia bezpieczeństwa obróbki, jest **morfologia wiórów ze stopów Mg, kształt, masa wiórów oraz występowanie nadtopień**. Podczas toczenia podejmowano próby kontroli wiórów, w sposób umożliwiający uzyskiwanie wiórów, które nie są łatwo zapalne. Wióry takie (wióry rurowe spiralne) obserwowano podczas próby toczenia nożem z płytką z węglików wolframu. Podane wióry powstają wraz ze wzrostem posuwu oraz zmniejszaniem głębokości skrawania [7]. Literatura [19] proponuje poszukiwanie śladów nadtopień lub przypaleń na powierzchniach bocznych wiórów. Ryzyko takie może wystąpić po przekroczeniu temperatury topnienia (dla Mg ok. 650°C) podczas obróbki. Do obserwacji nadtopień użyto skaningowej mikroskopii elektronowej SEM. Nie znaleziono nadtopień na obserwowanych wiórach, przedstawionych na rys. 1.6a.



Rys. 1. 6. Obserwacje wiórów ze stopów Mg: a) analiza nadtopień w procesie frezowania stopu magnezu AZ91 [19] oraz b), c) obrazy SEM dla płytkowych struktur lamelarnych wiórów [87]

Wióry ze stopów magnezu mają charakterystyczną budowę. Z jednej strony składają się z tzw. płytkowych struktur lamelarnych, z drugiej ich powierzchnia jest błyszcząca i gładka. Lamelle to regularne struktury warstwowe, najczęściej równoległe ułożone względem siebie. Błyszcząca i gładka powierzchnia powstaje na skutek kontaktu wióra z powierzchnią natarcia narzędzia. Przykłady struktur lamelarnych przedstawiono na rys 1.6b, c oraz rys. 1.7.



Rys. 1. 7. Powstawanie struktur lamelarnych uzyskanych przy różnych prędkościach skrawania v_c : a) 1200m/min, b) 1600m/min, c) 2400m/min [24]

W procesie skrawania stopów magnezu wzmacnianych osnową metalową występuje podobnie jak w przypadku obróbki stopów Al o zawartości powyżej 12% Si, istotnie większe obciążenie ostrzy i ich powłok z uwagi na dużą twardość cząstek wzmacniających oraz intensywne oddziaływanie ściernie. W tym przypadku jako materiały narzędziowe, zastosowanie znajdują niemalże wyłącznie: polikrystaliczny diament (stosowany na ostrza z płytkami PKD) lub powłoki diamentowe ze zwiększoną grubością ($20\div30$) μm [53].

Wstępne wytyczne doboru parametrów skrawania [13], przy obróbce stopów magnezu, mogą być podyktowane, np. średnicą obrabianego elementu lub średnicą narzędzia obróbkowego, rodzajem materiału narzędziowego, rodzajem stopu magnezu oraz rodzajem prowadzonej obróbki. Dobór parametrów przeprowadza się w oparciu o wzory matematyczne. Dobór ten dotyczy takich operacji obróbkowych jak: toczenie wzdłużne, toczenie rowków, wiercenie, rozwiercanie, pogłębianie oraz frezowanie.

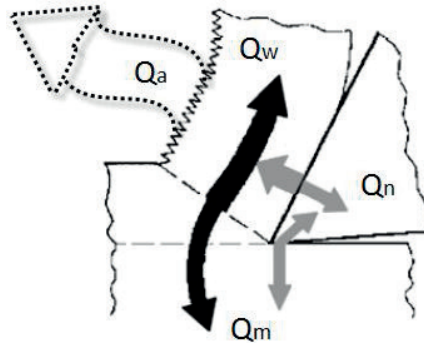
2.5. Ciepło w procesach obróbki skrawaniem

Ciepło wytwarzane w procesie skrawania nie powstaje równomiernie w całej masie odkształconej warstwy wierzchniej, wskutek tego temperatura w różnych punktach wióra, materiału obrabianego i ostrza różni się bardzo znacznie [31]. Interesująca z punktu widzenia bezpieczeństwa obróbki jest znajomość maksymalnej temperatury występującej w strefie skrawania. Z punktu bezpieczeństwa obróbki frezowaniem stopów magnezu, interesująca jest maksymalna temperatura jaka występuje na powierzchni wióra, podczas jego formowania. Ze względu na możliwość stosowania obecnie nowoczesnej, wydajnej, a tym samym efektywnej obróbki frezowaniem, czas formowania się wióra (dla prędkości skrawania v_c ($150\div1200$) m/min) zawiera się w przedziale ($0,01\div0,001$) sekundy. Z przeprowadzonej dotąd analizy wynika, że typowy zakres prędkości skrawania przy frezowaniu stopów magnezu, w przypadku stosowania frezów trzpieniowych, w przedsiębiorstwach krajowych, wynosi v_c ($50\div150$) m/min .

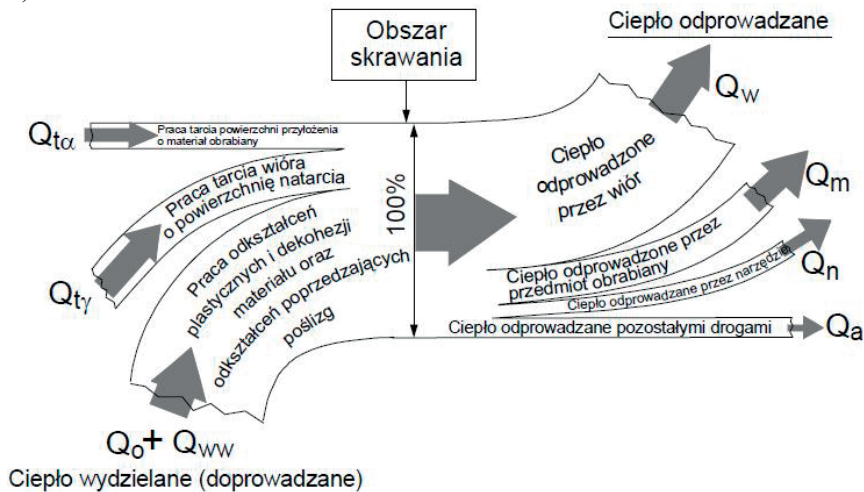
Szybkie odkształcanie oraz tarcie wióra o powierzchnię natarcia ostrza powodują wydzielanie dużych ilości ciepła [70]. W zależności od mocy źródeł ciepła i intensywności strumieni cieplnych (rys. 1.8) w strefie skrawania powstaje złożone pole temperatury obejmujące charakterystyczne obszary odkształcenia plastycznego i intensywnego tarcia. Ogólnie można stwierdzić, że rozkład temperatury jest zdecydowanie nierównomierny, a tam gdzie strumienie odkształcenia plastycznego spotykają się ze strumieniami ciepła tarcia, temperatura może osiągnąć znaczne wartości [23]. Praktycznie cała energia skrawania zamieniana jest na ciepło. Załedwie ok. 1% tej energii jest magazynowany w postaci naprężenia pozostającego w wiórach i materiale

obrabanym. Dlatego zjawiska cieplne w strefie skrawania, a przede wszystkim temperatura ostrza mają istotne znaczenie dla procesu skrawania [30].

a)



b)



Rys. 1. 8. Ciepło w procesie skrawania: a) rozkład ciepła, b) rozpraszanie ciepła w strefie skrawania [22, 23, 70]

Wydzielone ciepło jest unoszone przez wiór (Q_w), przejmowane przez ostrze narzędzia (Q_n), przewodzone do materiału obrabianego (Q_m) oraz unoszone do atmosfery otoczenia bądź przejmowane przez płyn obróbkowy (Q_a). W przypadku obróbki na sucho strumień ciepła przechodzący do atmosfery otoczenia stanowi ok. 1% i zwykle jest pomijany [23]. Intensywność strumieni cieplnych, a przez to wartość temperatury w analizowanych obszarach, zależy od przewodności i pojemności cieplnej materiałów – obrabianego i narzędziowego, sposobu chłodzenia i parametrów skrawania, z których decydujący wpływ wykazuje prędkość skrawania [23, 33], mniejszy wpływ wykazuje posuw, a najmniejszy głębokość skrawania.

Czynniki wpływające na temperaturę skrawania można podzielić na trzy grupy: związane z materiałem skrawanym, związane z materiałem ostrza narzędzia skrawającego, związane z parametrami skrawania. Temperatura w strefie skrawania jest tym wyższa, im większa jest twardość i wytrzymałość materiału skrawanego oraz opór właściwy skrawania. Wpływ materiału ostrza można ocenić pośrednio, porównując przewodność cieplną tych materiałów. Dla materiałów ostrza o mniejszej przewodności cieplnej temperatura ostrza jest wyższa. Również wartość kąta natarcia wyraźnie wpływa na temperaturę skrawania. Im większy kąt natarcia, tym mniejsza temperatura skrawania, co jest tłumaczone zmniejszeniem pracy odkształcenia plastycznego materiału skrawanego oraz zmniejszeniem tarcia wióra o powierzchnię natarcia ostrza. Przy skrawaniu z ujemnymi kątami natarcia temperatura ostrza jest zawsze znacznie większa niż przy dodatnich kątach natarcia [22].

Zwiększanie prędkości skrawania powoduje zmniejszanie ilości ciepła przechodzącego do materiału oraz zwiększanie procentowej ilości ciepła unoszonego z wiórem i zmniejszanie procentowej ilości ciepła, która przechodzi do ostrza. Z praktycznego punktu widzenia ważniejsza od ilości ciepła jest przede wszystkim wysokość oraz rozkład temperatury [31].

Wpływ parametrów skrawania na temperaturę ostrza [30] można wyrazić następująco:

$$t = C_t \cdot f \cdot y_t \cdot v_c \cdot z_t \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (1.1)$$

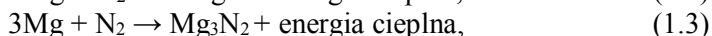
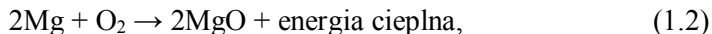
gdzie: t – temperatura ostrza [$^\circ\text{C}$],
 C_t , y_t , z_t – stałe wyznaczone doświadczalnie,
 v_c – prędkość skrawania [m/min],
 f – posuw [mm/obr].

Należy jednak pamiętać, że jest to wzór empiryczny, nie mający praktycznego znaczenia ze względu na istniejące stałe w równaniu, należy także pamiętać o zgodności wymiarowej takich wzorów. Nie można zatem mówić o temperaturze, którą można jednoznacznie określić cały przebieg procesu skrawania, gdyż decyduje o tym pole temperatury. Ponieważ charakter tego pola pozostaje na ogół jednakowy, a zmienia się tylko wartość temperatury, to określając temperaturę w danym punkcie ostrza, można mieć wyobrażenie o kształtowaniu się temperatury w innych punktach. W tym więc znaczeniu można mówić o temperaturze skrawania, podając jednocześnie punkt, w którym była ona mierzona lub jaką metoda była mierzona. W praktyce największe znaczenie ma znajomość temperatury maksymalnej. Dlatego też, gdy nie wyjaśnia się bliżej o jaką temperaturę chodzi, przez temperaturę skrawania rozumiemy temperaturę maksymalną [31].

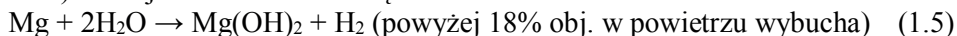
Podczas oddawania ciepła magnez łatwo reaguje z innymi substancjami, co przedstawiają podane zależności (1.2÷1.5). Reakcja magnezu z wodą objawia

się poprzez tworzenie wodoru (H_2) oraz wzrost wykładnika pH [53]. Reakcje chemiczne magnezu z różnymi substancjami [23, 53, 54]:

a) reakcje z gazami:



b) reakcje chemiczne z wodą:



Dysocjacja wody na jej składniki (wodór i tlen) powoduje zagrożenie eksplozją [54]. 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 [93, 94].

Ogólnie do pomiaru temperatury w procesie skrawania używa się technik opartych na przewodzeniu lub promieniowaniu ciepła. Równoważnie można je określić jako stykowe i bezstykowe. W pierwszym przypadku wymiana ciepła między czujnikiem temperatury a ciałem polega na przewodzeniu, w drugim odbywa się przez promieniowanie lub przesyłanie sygnałów pomiarowych do przyrządu pomiarowego [23, 60]. Do ważniejszych metod eksperymentalnych pomiaru temperatury w strefie skrawania, możemy zaliczyć [22, 23, 30, 60]:

a) metody oparte na zasadzie *pomiaru siły termoelektrycznej* – metody te oparte są na zjawisku Peltiera (występowanie siły termoelektrycznej w punkcie styku dwóch różnych metali) oraz zjawisku Thomsona (siła termoelektryczna może wystąpić również na długości poszczególnych przewodów obwodu zamkniętego o ile ma miejsce gradient temperatury). Charakterystyki oraz tolerancje termoelementów zawarto w Normach PN-EN 60584-1:1997 oraz PN-EN 60584-2:1997. Termoelementy płaszczone podaje Polska Norma PN-EN 61515:1999.

Termopary pokrywają szeroki zakres mierzonych temperatur. Typowa dokładność pomiaru wynosi $\pm(1\div 2)^\circ C$, co przekracza wymaganą dokładność w większości zastosowań przemysłowych. Termopary rodzaju J, K, N, E i T są ekonomiczne, niezawodne i stosunkowo dokładne. Zakres zastosowań tych rodzajów termopar rozciąga się od $-200^\circ C$ do $1700^\circ C$. Przykładowo termopara typu K znajduje zastosowanie jako standard przemysłowy dla temperatur do $1250^\circ C$ [108]. Specyficznym rodzajem termopar są termoelementy płaszczone [103, 107], wewnątrz których znajdują się druty termoelektryczne oraz materiał izolacyjny (sprasowany proszek mineralny, przeważnie tlenek magnezu).

Błędy pomiaru termoelementami [103] związane są głównie z niejednorodnością termoelementów, błędami wynikającymi z niewłaściwego miejsca pomiaru, błędy wynikające z dryftu, błędy wynikające z niewłaściwego

przewodu kompensacyjnego. Dodatkowo pomiary z termoparami wymagają użycia styku odniesienia. Zamiast uciekać się do oddzielnego styku termopary i styku temperatury odniesienia dla każdego z kanałów, zaprojektowane dla termopar systemy akwizycji danych zwykle zawierają blok izotermiczny z wbudowanym czujnikiem temperatury odniesienia. Chociaż cechy te dają w efekcie większą złożoność i koszty sprzętu, to upraszczają korzystanie z termopar [108].

b) metody wykorzystujące zjawisko ***promieniowania podczerwonego*** wykorzystywane przy pomiarach pirometrami oraz kamerami termowizyjnymi. Jednak pomiary z wykorzystaniem promieniowania podczerwonego są utrudnione ze względu na zmianę współczynnika emisyjności materiałów nie tylko wraz z temperaturą, ale również w wyniku zmiany barwy, czy chropowatości.

Zgodnie z zasadą zachowania energii, współczynnik określający jak materiały odbijają, absorbują i przepuszczają energię promieniowania podczerwonego jest znany jako emisyjność materiału. Emisyjność ciała jest zdefiniowana, jako stosunek energii promieniowania emitowanego przez ciało do energii promieniowania, która mogłaby być wyemitowana przez ciało czarne w tej samej temperaturze. Emisyjność zależy od stanu powierzchni obiektu, temperatury i długości fali [89].

Niedokładności pomiarów termowizyjnych [51, 109] są szczególnie widoczne w sytuacji pomiaru pola temperatury składającego się z różnych obiektów o różnej emisyjności. Z tego względu kamery termowizyjne zaleca się stosować do zdalnego określania rozkładu temperatury obiektów jednorodnych. Mimo, że rozdzielczość typowej kamery w warunkach kalibracji wynosi 0,1K to wartość zmierzonej temperatury w warunkach rzeczywistych obciążona jest bardzo wieloma wielkościami wpływowymi. Z tego powodu analiza wyników każdego pomiaru wymaga indywidualnego podejścia.

Przy pomiarach temperatury obiektów z zastosowaniem kamer termowizyjnych należy się liczyć z następującymi rodzajami błędów [51, 109]:

- błędy metody, do których w warunkach rzeczywistych zaliczamy: błąd oszacowania emisyjności ε obiektu, błąd spowodowany wpływem odbitego przez obiekt promieniowania otoczenia oraz wpływem promieniowania samego otoczenia, błąd spowodowany ograniczoną transmisją atmosfery oraz jej promieniowaniem (emisją), błąd spowodowany brakiem możliwości uśredniania wyników pomiarów,
- błędy kalibracji, z którymi związane są błędy dotyczące rzeczywistych warunków pomiaru termowizyjnego: promieniowanie własne elementów optycznych i filtrów kamery ma inne wartości niż w warunkach kalibracji i zależne jest od temperatury oraz emisyjności układów optycznych, odległość obiekt – kamera jest z reguły inna niż w trakcie kalibracji, w warunkach kalibracji precyzyjnie jest określona emisyjność obiektu, pomijalny jest natomiast wpływ promieniowania otoczenia odbitego od

ciała doskonale czarnego oraz ograniczonej rozdzielczości temperaturowej kamery, ograniczonej dokładności wzorca, ograniczonej ilości punktów wzorcowania i błędów interpolacji,

- błędy toru elektronicznego, na które mają wpływ: szумы detektora, niestabilność układu chłodzenia (dla kamer z matrycami chłodzonymi), wahania wzmocnienia przedwzmacniacza i innych układów elektronicznych kamery, ograniczone pasmo przenoszenia detektora i innych układów elektronicznych kamery, ograniczona rozdzielczość i nieliniowość przetworników analogowo-cyfrowych.

c) metody termokolorów – polegają na pokrywaniu powierzchni roboczych substancjami chemicznymi, które charakteryzują się trwałą zmianą barwy po przekroczeniu określonej temperatury. Metoda ta umożliwia uzyskanie obrazu pola temperatur na tych powierzchniach ostrza, które nie ulegają ścieraniu w procesie obróbki,

d) metody *termometrów półprzewodnikowych* – wykorzystanie termistorów do pomiarów temperatury w określonym punkcie narzędzia lub przedmiotu obrabianego,

e) metody *powstawania granic* między stopioną a niestopioną strefą cienkiego filmu materiału o znanej temperaturze topnienia naniesionego na ostrze metodą PVD,

f) metody *powstawania strefy wpływów cieplnych i zmiany struktury* materiału narzędziowego lub materiału obrabianego. Jak podano w [1, 30] rozkład temperatury można uzyskać badając ostrze na podstawie czasu skrawania, zmierzonej mikrotwardości oraz odpowiednich charakterystyk odpuszczania (temperatura-czas-mikrotwardość). Metoda pozwala na określanie temperatury (wartości punktowych oraz rozkładu temperatury) tylko w przypadku obróbki narzędziami ze stali narzędziowej lub szybko tnącej.

W zastosowaniach przemysłowych stosowane są cztery podstawowe metody pomiaru temperatury [103]:

- pomiary wykorzystujące zmianę rezystancji czujnika,
- pomiary wykorzystujące zjawisko termoelektryczne (termopary są źródłami sygnału pomiarowego),
- pomiary wykorzystujące zjawisko podczerwieni (pirometry),
- pomiary czujnikami, w których pomiar jest przetwarzany w sensorze na postać cyfrową, a zmierzona wartość jest przekazywana do urządzenia odczytowego w formie binarnej (przyjmującej tylko dwie wartości).

2.6. Wnioski z analizy literatury

Analiza literatury w zakresie skrawalności stopów magnezu wykorzystywanych w różnych gałęziach przemysłu pozwala na sformułowanie następujących wniosków ogólnych:

- stopy magnezu dzięki swoim zaletom odgrywają ważną rolę w produkcji elementów konstrukcji lotniczych, samochodowych, sprzęcie elektro-nicznym, sportowym oraz w medycynie,
- analiza wielu wskaźników skrawalności oraz innych czynników związanych, np. z definiowaniem bezpieczeństwa obróbki tych stopów, pozwala na określenie efektywnych, a jednocześnie bezpiecznych warunków skrawania,
- większość informacji z zakresu skrawalności stopów magnezu pochodzi głównie z publikacji zagranicznych,
- w literaturze (zarówno zagranicznej jak i krajowej) znaleźć można wiele publikacji dotyczących badań właściwości mechanicznych oraz odporności korozyjnej stopów magnezu bez analizy procesów obróbki,
- prowadzone prace (których wyniki zawarto w publikacjach zagrani-cznych) mają często charakter wyłącznie rozważań naukowych, występuje brak ukierunkowania prowadzonych badań (w aspekcie zastosowania, aplikacji) na potrzeby krajowego przemysłu lotniczego,
- ryzyko zapłonu wiórów podczas obróbki jest wciąż ważnym problemem naukowym i istotnym dla aplikacji stopów magnezu w przemyśle,
- dokonując analizy literatury stwierdzono brak wytycznych doboru technologicznych parametrów skrawania pozwalających wspomagać proces decyzyjny.

Na podstawie dokonanej analizy literatury, związanej z zagadnieniami dotyczącymi wytwarzania stopów magnezu (zwłaszcza poprzez frezowanie), możliwe jest stwierdzenie, że problem ten jest istotny z punktu widzenia naukowego oraz wykorzystania uzyskanych wyników badań w praktyce przemysłowej. Analiza literatury potwierdza, że problematyka podjęta w pracy nie jest w dostatecznym stopniu poznana. Rozwój zarówno metod wytwarzania jak i możliwości technologicznych maszyn obróbkowych sprawił, że istotna wydaje się ocena relacji pomiędzy efektywnością wytwarzania i bezpieczeństwem obróbki stopów Mg. Jak wykazuje praktyka oraz analiza literatury do niebezpiecznych zjawisk w strefie skrawania może dochodzić również w zakładach, gdzie zachowuje się wysoką dyscyplinę technologiczną. Szczególnie istotna staje się więc analiza problematyki bezpiecznej, a jednocześnie efektywnej obróbki na sucho stopów Mg, przy minimalizacji ryzyka zapłonu wiórów podczas tej obróbki.

Niestety, ze względu na złożoność zagadnienia nie ma uniwersalnej metody oceny bezpieczeństwa podczas obróbki, celowe jest posługiwanie się wieloma wskaźnikami (np. skrawalności) oraz stosowanie opisu pozwalającego na wielowątkową analizę bezpieczeństwa obróbki. W literaturze brak jest opracowań dotyczących wartości bezpiecznych oraz efektywnych parametrów technologicznych frezowania. Dlatego też ważnym wydaje się podjęcie proponowanej problematyki przez autora.

3. TEMAT, CEL, HIPOTEZY BADAWCZE I ZAKRES ROZPRAWY

Tematem rozprawy jest „**Wpływ warunków technologicznych na efektywność i bezpieczeństwo frezowania stopów magnezu**”. Innowacyjne materiały konstrukcyjne oraz nowoczesne metody kształtowania są interesującym zagadnieniem dla wiodących przedsiębiorstw branży mechanicznej. Podjęty temat rozprawy, wpisuje się w dyscyplinę budowa i eksploatacja maszyn, gdyż dotyczy wytwarzania nowoczesnych elementów maszyn, m.in. na potrzeby przemysłu lotniczego.

3.1. Uzasadnienie podjęcia tematu

Realizowana rozprawa naukowa dotyczy obróbki skrawaniem stopów magnezu. Ze względu na znane trudności w obróbce stopów magnezu (niebezpieczeństwo zapłonu), w specyficznych warunkach także wybuchu oraz brak jednolitych wskazówek dotyczących bezpiecznej obróbki tych stopów, istnieje rzeczywista potrzeba badań i analiz w tej problematyce. Wyniki uzyskane w rozprawie doktorskiej pozwolą na pełniejszą znajomość problemu a także określenie bezpiecznego zakresu technologicznych parametrów obróbki oraz zakres, którego należy unikać. Funkcją celu jest odpowiednia efektywność procesu przy wysokiej dokładności powierzchni.

Problematyka rozprawy została podjęta ze względu na zapotrzebowanie, głównie przemysłu lotniczego, opracowania zasad bezpiecznej, a jednocześnie efektywnej obróbki stopów Mg. Większość stosowanych części na elementy konstrukcyjne śmigłowców i płatowców obrabiane jest mechanicznie poprzez obróbkę frezowaniem. Wzrost parametrów skrawania, powoduje wzrost wydajności obróbki, krótsze czasy maszynowe oraz znaczne oszczędności kosztów wytwarzania. Związane jest to jednak z oceną ryzyka wystąpienia tych zjawisk które pogarszają poziom bezpieczeństwa podczas obróbki. Rozwiązania technologiczne, które powstaną w wyniku realizacji rozprawy mogą wpłynąć na rozwój polskich firm lotniczych, podniesienie poziomu ich innowacyjności, a poprzez to rozwój gospodarki zarówno w skali regionalnej, jak i w skali kraju.

3.2. Sformułowanie problemu badawczego

Ocena skrawalności, na podstawie analizy wielu wskaźników skrawalności nowoczesnych metali konstrukcyjnych, jest zagadnieniem złożonym. Szczególnie istotnymi wskaźnikami skrawalności (z punktu widzenia efektywnej a zarazem bezpiecznej obróbki stopów Mg) są: chropowatość powierzchni, temperatura w strefie skrawania, czas do zapłonu, rozdrobnienie wióra. Efektywność rozumiana jest w tym przypadku, jako efekt obróbki, mierzony

wydajnością procesu i jakością obrabianych powierzchni uzyskany z określonymi parametrami technologicznymi.

Efektywność obróbki frezowaniem może być również definiowana, jako stosunek poniesionych nakładów (w naszym przypadku głównie ceny narzędzi, materiałów) do wartości uzyskanych efektów, dzięki tym nakładom. W szerszym ujęciu pojęcie efektywność oznacza najlepsze rezultaty w produkcji po najniższych kosztach.

Ważnym elementem w procesie wytwarzania elementów ze stopów Mg jest możliwość skutecznego recyklingu wiórów, jak wiadomo istotnym utrudnieniem w tym względzie są ciecze technologiczne wykorzystywane w procesie obróbki. Najkorzystniej jest poddawać procesowi recyklingu wióry suche.

Drugim, równie ważnym aspektem, jest bezpieczeństwo podczas obróbki. Bezpieczna obróbka to taka, która nie powoduje zagrożenia zapłonem wiórów podczas skrawania oraz minimalizuje ryzyko uszkodzenia elementów maszyn i urządzeń. Bezpieczną obróbkę determinuje temperatura wiórów w strefie skrawania, czas do zapłonu wióra oraz fragmentowanie wiórów. Ważnym elementem naukowym podejmowanej problematyki jest poszukiwanie, odpowiednimi metodami naukowymi, w przestrzeni zmienności technologicznych parametrów obróbki, takich ich wartości, które zapewniają uzyskanie możliwie najwyższej wydajności procesu, dla zadanych cech jakościowych powierzchni i zapewnieniu bezpiecznej obróbki w kontekście możliwości zapłonu wiórów.

3.3. Hipotezy badawcze rozprawy

Biorąc pod uwagę przedstawiony problem badawczy oraz aktualny stan wiedzy w obszarze objętym problematyką rozprawy sformułowano następujące hipotezy badawcze:

Hipoteza 1

Istnieje bezpieczny, w aspekcie możliwości zapłonu wiórów, zakres parametrów technologicznych frezowania na sucho stopów magnezu, który umożliwi istotną poprawę wydajności obróbki w stosunku do aktualnie osiąganey w warunkach przemysłowych.

Hipoteza 2

Kształt i wielkość wióra nie stanowią wystarczającej przesłanki do oceny podatności na zapłon wiórów w trakcie obróbki.

3.4. Cel i zakres rozprawy

Celem prowadzonych badań jest analiza skrawalności wybranych stopów magnezu w aspekcie bezpiecznej, a jednocześnie wydajnej (efektywnej) obróbki frezowaniem oraz wyznaczenie zalecanych warunków pracy (bezpiecznych oraz efektywnych warunków technologicznych skrawania). Z reguły w warunkach przemysłowych podczas skrawania stopów Mg używa się odpowiednich cieczy chłodząco-smarujących. Stosowanie tych cieczy istotnie zwiększa koszty obróbki, utrudnia także proces recyklingu wiórów. Istotnym problemem jest bliższe rozpoznanie procesu obróbki na sucho stopów Mg. Wykazanie, że możliwa jest bezpieczna obróbka na sucho tych stopów stanowiłaby istotnie ważną informację dla firm obrabiających stopy magnezu. Przypuszcza się, że istnieje możliwość bezpiecznej obróbki na sucho, przy akceptowalnej wydajności objętościowej i jakości powierzchni.

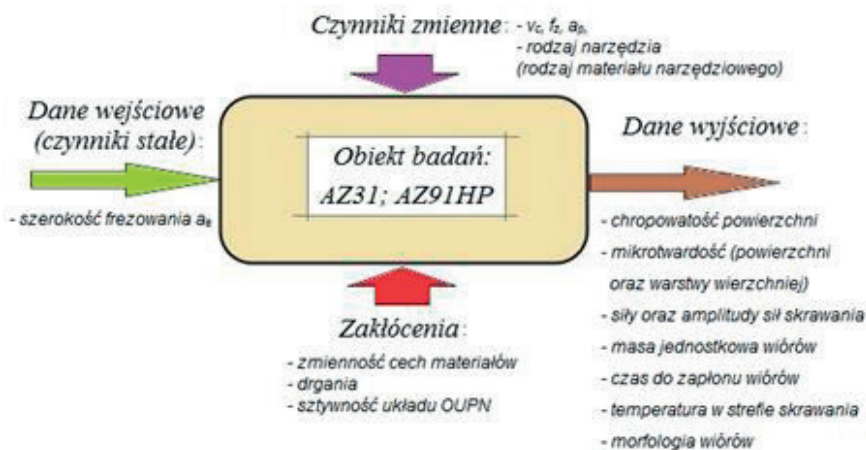
Do analizy skrawalności wybranych stopów magnezu przeprowadzone będą badania doświadczalne, obejmujące wykonanie prób frezowania wytypowanymi narzędziami z różnymi wartościami parametrów technologicznych. W ramach badań będą wykonywane pomiary chropowatości, mikrotwardości powierzchni oraz mikrotwardości warstwy wierzchniej, pomiary sił oraz amplitud sił skrawania, temperatury w strefie skrawania, masy wiórów, czasu do zapłonu, analiza fragmentacji i morfologii wiórów, analiza stanów morfologicznych poprzedzających zapłon wióra. Obróbka prowadzona będzie na sucho. Analiza wymienionych wskaźników skrawalności pozwoli na opracowanie zaleceń bezpiecznych oraz efektywnych parametrów technologicznych obróbki.

4. METODYKA BADAŃ

Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu wiedzy na temat skrawalności stopów magnezu oraz w oparciu o podstawy planowania eksperymentu, opracowano następującą metodykę badań eksperymentalnych oraz zaproponowano aparaturę badawczą do realizacji tych celów.

4.1. Obiekt badań

Obiektem badań były dwa stopy magnezu: stop AZ91HP oraz stop AZ31. Analizowano skrawalność wymienionych stopów magnezu w oparciu o wybrane tzw. wskaźniki skrawalności.



Rys. 3. 1. Plan badań obejmujący analizę wskaźników skrawalności

Na rys.3.1 zaprezentowano ogólny plan badań dotyczący wpływu różnych czynników na niektóre wskaźniki skrawalności stopów magnezu. Jako czynniki zmienne przyjęto: prędkość skrawania v_c , posuw na ostrze f_z , głębokość skrawania a_p , rodzaj narzędzia (rodzaj materiału narzędziowego). Czynnikiem stałym (dane wejściowe) była szerokość frezowania a_e . Jako dane wyjściowe analizowano:

- chropowatość powierzchni obrobionej (R_a, R_z DIN),
- mikrotwardość powierzchni oraz mikrotwardość warstwy wierzchniej,
- siły skrawania (F_x, F_y, F_z) oraz amplitudy sił skrawania (AF_x, AF_y, AF_z),
- masę jednostkową wiórów,
- czas do zapłonu wiórów,
- temperaturę w strefie skrawania,
- morfologię wiórów (analiza fragmentowania wiórów, "nadtopień krawędziowych" wiórów oraz etapów poprzedzających zapłon).

4.1 Obiekt badań

Na podstawie przeglądu literatury oraz doświadczeń przemysłowych przedsiębiorstw, zwłaszcza branży lotniczej, wytypowano często stosowane stopy magnezu. Z grupy stopów odlewniczych wybrano stop AZ91HP, stosowany m.in. na obudowy przekładni lotniczych. Z grupy stopów przeznaczonych do obróbki plastycznej wybrano stop AZ31. Skład chemiczny wymienionych stopów magnezu przedstawiono w tabeli 3.1.

Tab. 3. 1. Skład chemiczny wytypowanych stopów magnezu [118, 123, 124]

Gatunek stopu	Skład chemiczny [%]							
	Cu	Mn	Mg	Zn	Si	Fe	Al	Inne
AZ31	-	0,25	reszta	0,81	0,01	0,003	2,9	Ni 0,0004 inne 0,3
AZ91HP	0,002	0,22	reszta	0,66	0,016	0,002	8,91	Ni 0,001 Be 0,001

Obróbkę frezowaniem prowadzono na pionowych centrach obróbkowych:

- FV 580A z systemem sterowania Fanuc 0iMC, o maksymalnej prędkości obrotowej wrzeciona $n=8000$ obr./min oraz maksymalnej prędkości ruchu posuwowego 24m/min,
- Avia VMC800HS z systemem sterowania Heidenhain iTNC 530, o maksymalnej prędkości obrotowej wrzeciona $n=24000$ obr./min oraz maksymalnej prędkości ruchu posuwowego 40m/min.

Na rys. 3.2 przedstawiono wygląd centrów obróbkowych, zastosowanych w badaniach.



Rys. 3. 2. Widok zastosowanych w badaniach centrów obróbkowych

Jako narzędzia wykorzystano trzy frezy o średnicy $d=16$ mm [114, 115, 116]:

- frez dwuostrzowy węglkowy z powłoką TiAlN firmy Fenes Harnden-Metal z grupy frezów specjalnych VHM do obróbki stopów Al oraz Mg z chwytem walcowym gładkim, wymiary frezu 16x25x100mm W-Z2, $\lambda_s=30^\circ$,
- frez dwuostrzowy z ostrzem diamentowym firmy Guhring PKD - Fraser WN-R 05492-16,001, $\lambda_s=0^\circ$,
- frez trzyostrzowy o geometrii typu Kordell o numerze katalogowym R216.33-16040-AJ20U (rodzaj geometrii Kordell typu U).

Na rys. 3.3 przedstawiono wygląd zastosowanych narzędzi dwuostrzowych.

a)



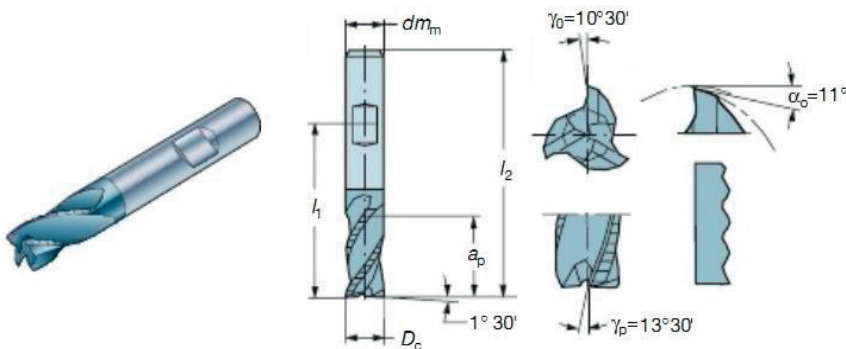
b)



Rys. 3. 3. Narzędzia dwu-ostrzowe zastosowane w badaniach: a) frez węglkowy z powłoką TiAlN, b) frez z ostrzem PKD

Wybór narzędzi podyktowany był aktualnym przeglądem narzędzi stosowanych w przemyśle (zwłaszcza lotniczym) oraz potrzebą wytypowania nowoczesnych narzędzi obróbkowych. Wytypowano frezy dwuostrzowe głównie ze względu na bardziej efektywne odprowadzanie wiórów ze strefy skrawania (większe rowki wiórowe w porównaniu, np. do narzędzi trzyostrzowych). Narzędzie z ostrzem PKD powinno zapewnić wysoką jakość powierzchni, przy wzroście intensywności wytwarzania.

Charakterystyczną cechą geometrii typu Kordell (rodzaj geometrii Kordell typu U) są faliście ukształtowane ostrza skrawające. Narzędzie to jest dedykowane do obróbki stopów aluminium (tzw. "pierwszy wybór"), a także stopów magnezu. Dodatkowo geometria ta charakteryzowana jest przez: kąt pochylenia linii śrubowej $\lambda_s=40^\circ$, maksymalną głębokość skrawania $a_p=(7\div45)\text{mm}$, brak promienia naroża r_ϵ , dodatni kąt natarcia $\gamma=(9^\circ\div12^\circ)$ dla zredukowania sił skrawania [114]. Na rysunku 3.4 przedstawiono cechy geometryczne geometrii typu Kordell.



Rys. 3. 4. Rysunek katalogowy frezu o geometrii typu Kordell (geometria U) firmy Sandvik [114]

Przy próbach frezowania zastosowano następujące dwa zakresy parametrów technologicznych, podyktowanych m.in. charakterystyką wrzeciona obrabiarki:

- $v_c=(150\div400)\text{m/min}$, $f_z=(0,05\div0,3)\text{mm/ostre}$, $a_p=(0,5\div6)\text{mm}$,
- $v_c=(500\div1200)\text{m/min}$, $f_z=(0,05\div0,3)\text{mm/ostre}$, $a_p=(0,5\div6)\text{mm}$.

Przyjęto również stałą szerokość frezowania $a_e=14\text{ mm}$.

4.1.1. Metodyka badań chropowatości powierzchni po obróbce frezowaniem

Do pomiaru chropowatości obrobionych powierzchni wykorzystano profilografometr Surtronic3+ firmy Taylor–Hobson. Urządzenie pozwala na pomiar z rozdzielczością $0,02\mu\text{m}$ dla parametru R_a oraz $0,1\mu\text{m}$ dla parametru R_z (DIN). Pomiarów wartości analizowanych parametrów chropowatości (R_a , R_z (DIN)) dokonano pięciokrotnie na każdej frezowanej powierzchni. Naniesione na wykresach odchylenia standardowe sporządzono więc dla pięciu powtórzeń z jednej próby frezowania z zadanymi parametrami obróbki. Analizowano również wpływ obecności powłoki narzędzia na parametry chropowatości powierzchni obrobionej. Na rys. 3.5 przedstawiono wygląd urządzenia.



Rys. 3. 5. Profilografometr Surtronic3+ firmy Taylor–Hobson

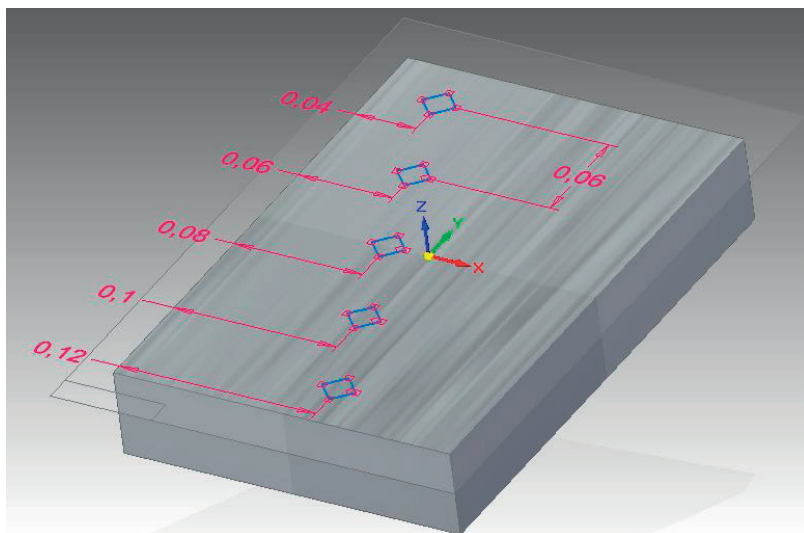
Na przedstawione wykresy chropowatości powierzchni po frezowaniu naniesiono linie łączące poszczególne punkty pomiarowe. Linie te jednak nie przedstawiają zależności funkcyjnych. Mają one jedynie na celu lepsze zobrazowanie czytelnikowi wpływu rodzaju narzędzia oraz stopu Mg na jakość powierzchni po frezowaniu. Zamieszczone linie należy traktować, jako pewne, bliżej niezdefiniowane funkcje trendu.

4.1.2. Metodyka badań mikrotwardości warstwy wierzchniej

Analizowano wpływ parametrów technologicznych frezowania na mikrotwardość powierzchni po frezowaniu oraz mikrotwardość warstwy wierzchniej stopów magnezu. Pomiary mikrotwardości wykonano przy pomocy mikrotwardościomierza Leco LM700AT Microhardness Tester. Zastosowano

diamentowy wgłębnik w kształcie ostrosłupa o podstawie kwadratu o kącie pochylenia przeciwległych ścianek 136° (metoda Vickers'a). Pomiar mikrotwardości przeprowadzono z obciążeniem wgłębnika równym 10g. Rozdzielczość dla tego typu mikrotwardościomierza wynosi 0,1HV.

Pomiary mikrotwardości przeprowadzono dla dwóch wariantów. Pierwszy dotyczył badań mikrotwardości wykonanych na powierzchni, drugi – badań mikrotwardości na zglądach poprzecznych. Badania przeprowadzono w oparciu o normę PN-EN ISO 6507-1.



Rys. 3. 6. Schemat rozmieszczenia odcisków wgłębnika przy pomiarach mikrotwardości warstwy wierzchniej stopów magnezu po frezowaniu (z zachowaniem normy PN-EN ISO 6507-1); pomiary wykonywano w przekroju poprzecznym próbki [79]

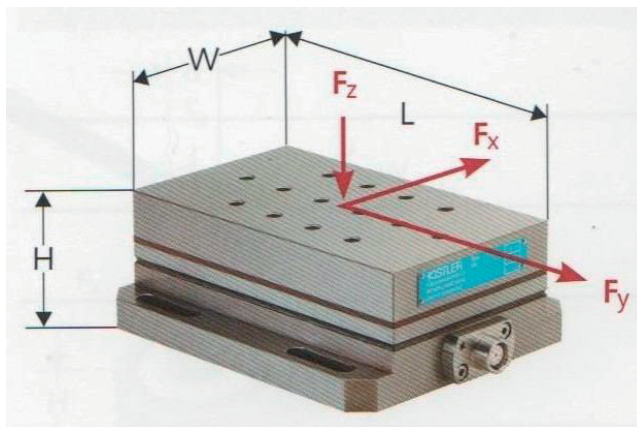
Na rys. 3.6 przedstawiono schemat wykonywania pomiarów mikrotwardości warstwy wierzchniej stopów magnezu. Pomiary wykonano w przekroju poprzecznym próbki. Pomiary mikrotwardości powierzchni wykonano 10 razy, natomiast pomiary mikrotwardości warstwy wierzchniej stopów magnezu przeprowadzono dwudziestokrotnie.

Pierwszy z pięciu odcisków mikrotwardości, wykonano w odległości $40\mu\text{m}$ od krawędzi próbki. Odległość pomiędzy kolejnymi odciskami wgłębnika, wyniosła $20\mu\text{m}$ (w linii poziomej), dla każdego odcisku.

4.1.3. Metodyka badań sił skrawania oraz ich amplitud

Do pomiaru sił skrawania zastosowany został siłomierz piezoelektryczny firmy Kistler 9257B oraz wzmacniacz 5017B. Siłomierz ten pozwala mierzyć siły w zakresie (-5 kN do $+5\text{ kN}$). Częstotliwość próbkowania wynosi 5 kHz .

Na rys. 3.7 przedstawiono siłomierz piezoelektryczny Kistler 9257B.



Rys. 3. 7. Widok siłomierza piezoelektrycznego Kistler 9257B z naniesionymi składowymi siłami skrawania [117]

Analizując wpływ parametrów technologicznych, brano pod uwagę maksymalną wartość składowych sił skrawania F_x , F_y , F_z oraz amplitudy tych sił AF_x , AF_y , AF_z .

Amplitudę sił określano, dla poszczególnych składowych jako połowa różnicy maksymalnej oraz minimalnej wartości siły skrawania, co przedstawia wzór 2.1:

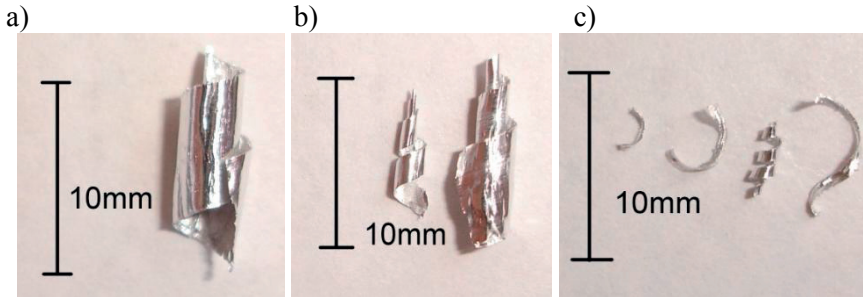
$$AF_{(x,y,z)} = (F_{\max} - F_{\min})/2 \text{ [N]} \quad (2.1)$$

gdzie: $AF_{(x,y,z)}$ – amplituda składowej siły skrawania [N],
 $F_{\max}$ – maksymalna wartość składowej siły skrawania [N],
 $F_{\min}$ – minimalna wartość składowej siły skrawania [N].

4.1.4. Metodyka badań masy wiórów ze stopów Mg

W celu umożliwienia opisu powstających wiórów wprowadzono pojęcie frakcji wiórów oraz fragmentacji wiórów. **Frakcja** jest to populacja cząstek o określonej wielkości lub określonych wymiarach. Na podstawie kształtu wióra wytypowano frakcję wiodącą (o największej masie jednostkowej i najbardziej reprezentatywną w sensie ilościowym) oraz frakcje pośrednie wiórów. Frakcja pośrednia była zdefiniowana w dwóch etapach: jako frakcja o innym kształcie (w stosunku do frakcji wiodącej wiórów) oraz jako frakcja o masie mniejszej (w większości przypadków) niż ok.50% masy frakcji wiodącej. **Fragmentacja** to zjawisko powstawania w trakcie obróbki, oprócz frakcji wiodącej (największej, charakterystycznej), frakcji o zróżnicowanym kształcie oraz masie wiórów. Jest to zjawisko niekorzystne ze względu na niebezpieczeństwo samozapłonu drobnych wiórów, powstawanie pyłów oraz zanieczyszczenie przestrzeni obrabiarki.

Na rys. 3.8 przedstawiono przykładowe fotografie wiórów, na podstawie których dokonano ich podziału na frakcje.



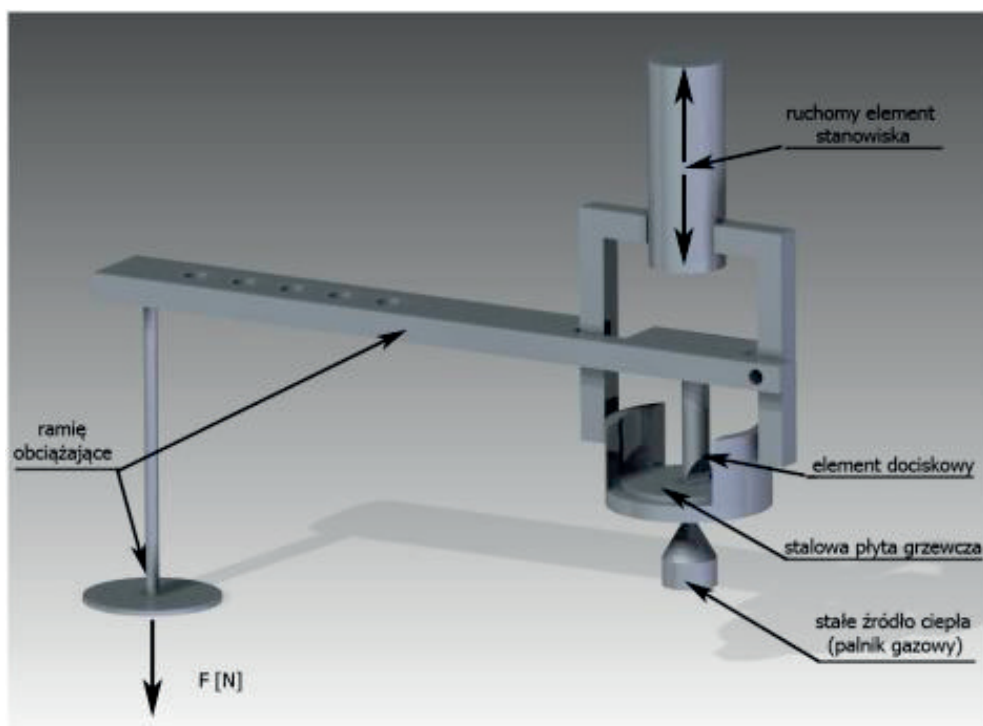
Rys. 3. 8. Przykładowe frakcje wiórów w przypadku stopu AZ91HP i narzędzia węglkowego z powłoką TiAlN: a) $v_c=400\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/strze}$, $a_p=6\text{mm}$, b) $f_z=0,05\text{mm/strze}$, $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$, c) $a_p=0,5\text{mm}$, $f_z=0,05\text{mm/strze}$, $v_c=800\text{m/min}$

Pomocną w analizie kształtu frakcji wiórów może być norma PN-ISO 3685:1996. Należy jednak pamiętać, iż podana norma dotyczy warunków obróbki podanych dla operacji toczenia stali. Jednak jak podano w [121] podział ten należy traktować jako przykład, biorąc pod uwagę fakt, iż może być kształtowana ogromna liczba różnych typów wiórów. Zalecane jest więc opracowanie systemu klasyfikacyjnego dotyczącego każdego rzeczywistego procesu obróbki.

Pomiarów masy dokonano na wadze laboratoryjnej o rozdzielczości 0,0001g. Pomiar masy wiórów wykonano pięciokrotnie dla każdej z frakcji wiórów (zarówno frakcji wiodącej, jak i frakcji pośrednich). Pomiar masy wiórów wykonano w przypadku zastosowania narzędzia węglkowego z powłoką TiAlN oraz narzędzia z ostrzem PKD. Nie analizowano natomiast masy wiórów uzyskanych podczas obróbki z zastosowaniem narzędzia węglkowego o geometrii typu Kordell. Analizę tę pominięto ze względu na fakt silnego fragmentowania wiórów w przypadku zastosowania tego typu narzędzia.

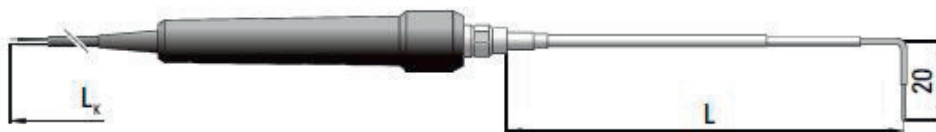
4.1.5. Metodyka badań czasu do zapłonu wiórów ze stopów Mg

Czas do zapłonu oraz temperaturę zapłonu wiórów określano na specjalnym, wykonanym dla potrzeb badań, stanowisku badawczym, poza obrabiarką. Schemat stanowiska do badania palności wiórów przedstawiono na rys. 3.9.



Rys. 3. 9. Schemat stanowiska do badania palności wiórów

Pomiar czasu do zapłonu wykonano pięciokrotnie dla każdej z frakcji wiórów. Podano również temperaturę maksymalną płyty grzewczej oraz temperaturę średnią, mierzoną w czasie 90 sekund. Pomiar temperatury płyty grzewczej wykonano z użyciem termopary płaszczonej typu K, przedstawionej na rys. 3.10 (typ termopary TP-102a-120, rodzaj termoelementu płaszczonego NiCr-NiAl). Termopara ta jest przeznaczona do pomiarów m.in. temperatury w cieczech, gazach oraz na powierzchni [107]. Czujnik ten współpracuje z miernikiem temperatury UNI-T, model UT-320, o dokładności pomiaru z termoparami K, J, T oraz E: $\pm[0,2\% + 0,6^{\circ}\text{C}]$.



Rys. 3. 10. Czujnik temperatury typu 102 [107]

W celach porównawczych przeprowadzono analizę etapów poprzedzających zapłon wióra przy pomocy szybkiej kamery wizyjnej Phantom 9.1.

4.1.6. Metodyka badań temperatury w strefie skrawania

Podczas procesu frezowania dynamiczne zmiany temperatury na powierzchni wióra rejestrowano przy użyciu kamery termowizyjnej FLIR SC6000HS. Kamera znajdowała się w odległości 0,9m od badanego przedmiotu obrabianego. Dzięki oprogramowaniu IR Control wprowadzono niezbędne zmiany w ustawieniach kamery oraz dostosowano jej parametry do prowadzonych badań. Oprogramowanie umożliwia wizualizację zdjęć wykonanych za pomocą kamery, a także pozyskanie danych zarówno całej sekwencji, jak i pojedynczej klatki. Program IR Control jest kompatybilny z oprogramowaniem MatLab, umożliwiającym bardziej szczegółowe opracowanie danych i ich wizualizację w postaci graficznej [86]. W tabeli 3.2 podano warunki badań eksperymentalnych.

Tab. 3. 2. Ważniejsze warunki badań eksperymentalnych [86]

CHARAKTERYSTYKA PARAMETRÓW	WARTOŚĆ
Temperatura otoczenia	22°C
Temperatura frezu przed każdą próbą	22°C
Odległość obiektywu od przedmiotu obrabianego	0,9m

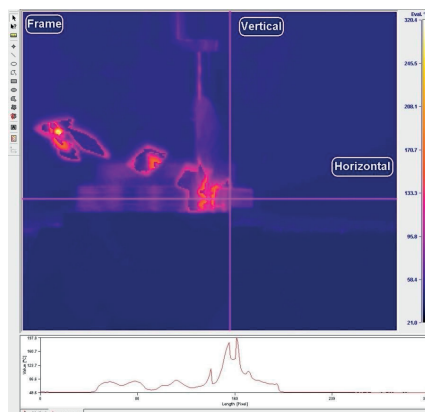
W celu uzyskania maksymalnej częstotliwości zbierania danych zawężono pole widzenia kamery. Przy rozdzielczości 320x256 osiągnięto częstotliwość na poziomie 400 Hz. Wykorzystano metodę Selekcji Presetów (*Preset Sequencing*), w celu zwiększenia zakresu pomiarowego kamery, co spowodowało zmniejszenie częstotliwości wykonywanych zdjęć z 400 Hz do 100 Hz. Było to spowodowane sposobem pracy kamery, która musiała wykonać cztery klatki w celu uzyskania jednej o rozszerzonym zakresie pomiarowym. Każdy z Presetów (ustawionych, skonfigurowanych fabrycznie zakresów), przy zadanej rozdzielczości 320x256, charakteryzował się różnym zakresem częstotliwości, oscylującym w granicach 400 Hz [86].

Podczas pomiarów temperatury za pomocą kamery bardzo ważne było ustalenie emisyjności źródła. Analizując przestrzeń roboczą centrum frezarskiego łatwo zauważyć, że wielkość obrabianej próbki stanowiła niewielką część obszaru „widzianego” przez kamerę. Trudno zatem jednoznacznie określić emisyjność celu, gdyż składa się on z wielu komponentów. W takich przypadkach należy ustalić za pomocą kalkulatora (*Emissivity Calculator*) tzw. oszacowaną emisyjność obszaru. W haśle tym mieści się emisyjność elementu obrabianego, frezu, a także całej przestrzeni roboczej. Program oszacował ją na podstawie panujących temperatur, co przedstawia rys. 3.11 [86].

W kalkulatorze emisyjności (*Emissivity Calculator*) określano temperaturę celu (*Target Temperature*) oraz średnią temperaturę w polu widzenia (*Calcu-*

lated Mean Temperature). Na tej podstawie program obliczył emisyjność obszaru widzialnego dla kamery. Aby uzyskać rzeczywiste temperatury występujące w procesie frezowania uwzględniono średnią emisyjność magnezu, która dla temperatury 260°C wynosiła 0,13 [86]. Wartość tą przyjęto z tablic emisyjności.

Widok interfejsu programu obsługującego kamerę termowizyjną przedstawiający jedną klatkę w przypadku skrawania stopu magnezu AZ31 narzędziem węglkowym z powłoką TiAlN przedstawiono na rys. 3.11. Podczas analizy temperatur w programie IR Control analizowano cały obszar strefy skrawania i wyznaczano temperaturę maksymalną, pojawiającą się w tym obszarze we wszystkich klatkach zapisywanej sekwencji danych [86].



Rys. 3. 11. Obraz z kamery termowizyjnej uzyskany przy pomocy oprogramowania IR Control, parametry technologiczne $f_z=0,05\text{mm}/\text{ostrze}$, $v_c=800\text{m}/\text{min}$, $a_p=6\text{mm}$ [86]

Liczba klatek w sekwencji zdjęć termicznych dla kolejnych testów różniła się ze względu na czas próby. Średnia ich liczba to blisko 400 klatek na test. Aby wykonać rzetelną ocenę generowanej temperatury w strefie skrawania postanowiono generować raporty dla każdego testu i na tej podstawie określić wartość generowanej temperatury w procesie skrawania [86].

Przy pomiarach temperatury obiektów z zastosowaniem kamer termowizyjnych należy się liczyć z następującymi rodzajami błędów [51, 109]: błędy metody (np. błąd oszacowania emisyjności ϵ obiektu, błąd spowodowany wpływem odbitego przez obiekt promieniowania otoczenia oraz wpływem promieniowania samego otoczenia), błędy kalibracji (błędy dotyczące rzeczywistych warunków pomiaru termowizyjnego), błędy toru elektronicznego (np. szumy detektora, niestabilność układu chłodzenia, ograniczona rozdzielczość i nieliniowość przetworników analogowo-cyfrowych).

Błędy pomiaru dotyczące zastosowania kamery termowizyjnej możemy podzielić również, na błędy wynikające ze zmiany (wraz z temperaturą) współczynnika emisyjności oraz błędy wynikające z dokładności pomiaru.

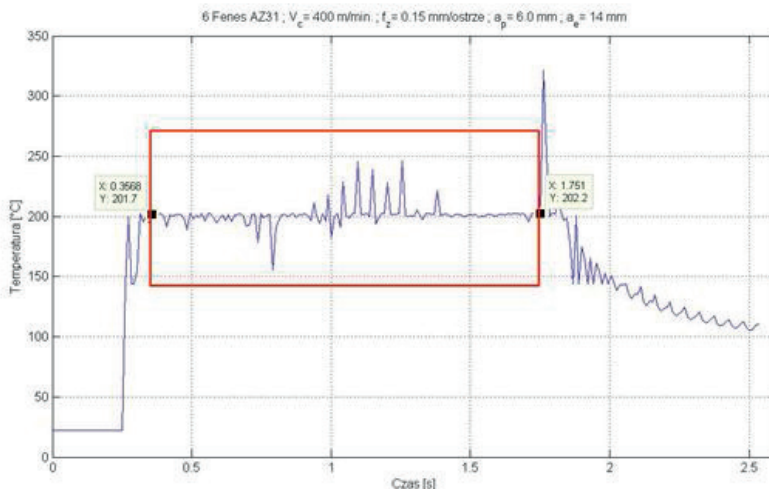
Na całkowity błąd pomiaru kamerą termowizyjną ma więc wpływ wiele czynników tj.: emisyjność, odległość obiektu od detektora, przepuszczalność atmosfery, parametry toru optycznego itd [109]. Ze względu na wiele czynników wpływających na całkowity błąd pomiaru kamerą termowizyjną w niniejszym opracowaniu oparto się na danych producenta kamery Flir, który to dla użytego typu kamery SC6000HS, oszacował wartość na ± 2 [°C] lub $\pm 2\%$ zakresu temperatury mierzonej. Ze względu na użycie funkcji dynamicznego rozszerzenia zakresu pomiarowego kamery założono gorszą ewentualność i błąd pomiaru określono na poziomie $\pm 2\%$ zakresu pomiarowego.

4.1.7. Dynamiczne zjawiska w strefie skrawania podczas pomiaru temperatury wiórów

Analizując otrzymane szeregi czasowe przebiegów temperatury wiórów zauważyć można lokalne i krótkotrwałe wzrosty temperatury. Wymaga to dokładniejszych analiz dotyczących zarówno oceny przyczyn tego zjawiska jak też oszacowania jego wpływu na ryzyko zapłonu wiórów. Lokalny, krótkotrwały wzrost temperatury w strefie skrawania wydaje się być zjawiskiem losowym.

Tak więc ze względu na zmienność uzyskiwanej temperatury (głównie podczas wejścia oraz wyjścia narzędzia) zaprezentowano przykładowe oszacowanie, dotyczące wspomnianego wzrostu temperatury. Analizowano więc w tym przypadku, zarówno całkowitą liczbę danych uzyskaną z całej sekwencji jak i środkowy obszar sekwencji danych, oznaczony czerwoną ramką [86].

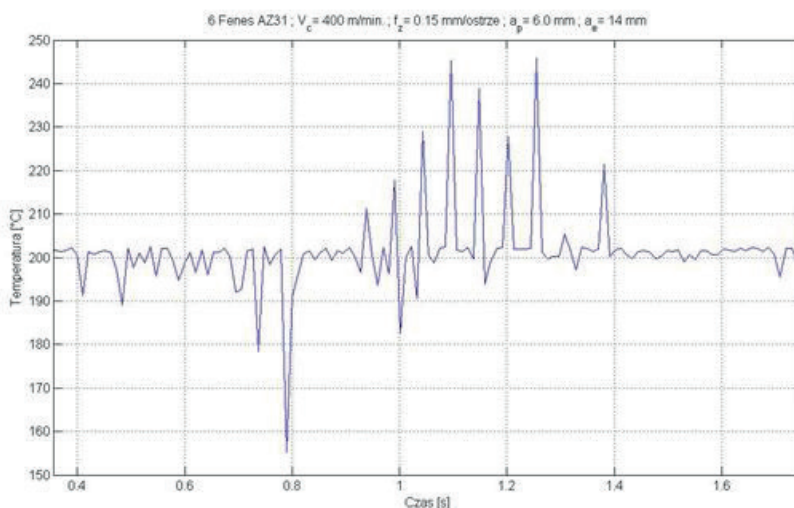
Na rys. 3.12 przedstawiono przykładowy przebieg zmian temperatury w strefie skrawania, obejmujący całkowitą liczbę danych.



Rys. 3. 12. Przykładowy przebieg zmian temperatury w strefie skrawania dla narzędzia węglowego z powłoką TiAlN oraz stopu AZ31 obejmujący całkowitą liczbę danych z sekwencji zdjęć termicznych (wraz z obszarem wejścia i wyjścia narzędzia) [86]

Analizując wszystkie dane z sekwencji, przedstawione na rys. 3.12 zauważyć możemy wzrost temperatury przy wyjściu narzędzia z materiału. W obszarze stabilnej obróbki temperatura oscyluje w granicach ok.250°C, natomiast w obszarze wyjścia temperatura ta wzrasta do ok.320°C. Jest to zjawisko niekorzystne, aczkolwiek w dużej mierze losowe.

Na rys. 3.13 przedstawiono przykład środkowej części danych z sekwencji zdjęć termicznych.



Rys. 3. 13. Przebieg zmian temperatury w strefie skrawania dla narzędzia węglowego z powłoką TiAlN oraz stopu AZ31 obejmujący środkową część danych [86]

Kolejnym etapem było utworzenie wykresów typu Boxplot m.in. w celu zobrazowania maksymalnych temperatur występujących w strefie skrawania. Wykresy te zamieszczono w kolejnej części rozprawy obejmującej wyniki badań.

4.1.8. Metodyka badań morfologii wiórów ze stopów Mg

Wykonano badania mikroskopowe wiórów powstających podczas obróbki przy skrajnych (najbardziej efektywnych w sensie wydajności) wartościach parametrów technologicznych frezowania: $v_c=1200\text{m/min}$ oraz $f_z=0,3\text{mm/ostre}$. Badania metalograficzne wiórów wykonano na mikroskopie optycznym Leica DFC450-C.

Badania te dotyczyły analizy obszarów uplastycznionych, nadtopień lub przypaleń na powierzchniach oraz krawędziach analizowanych wiórów, analizy intensywnego utleniania oraz produktów powstałych po zapłonie.

4.2. Metodyka statystycznego opracowania wyników badań

W celu oceny (weryfikacji) statystycznej przedstawionych wyników badań, przedstawiono zależności pozwalające na określanie: liczebności próby, niepewności pomiaru, normalności rozkładu oraz weryfikację hipotez o równości wartości średniej oraz wariancji.

Wyznaczenie liczebności próby n przeprowadzono na podstawie zależności [34, 67]:

$$n \geq \frac{z_{\alpha}^2 * \sigma^2}{d^2} \quad (3.1)$$

gdzie:

z_{α} – wartość z tablic dystrybucyj rozkładu normalnego $N(0,1)$ dla określonego $1-\alpha$,

σ – odchylenie standardowe,

d – dopuszczalny błąd szacunku.

Zgodnie z wzorem 3.1 określono liczebność próby, dla zadanego poziomu istotności $\alpha=0,05$ w przypadku analizy takich wskaźników jak: chropowatość powierzchni obrobionej, masa wiórów, czas do zapłonu na poziomie $n=5$ prób. Pomiaru mikrotwardości powierzchni wykonano $n=10$ razy, natomiast mikrotwardości warstwy wierzchniej, $n=20$ razy (w każdej płaszczyźnie).

Dodatkowo wykonano oszacowanie niepewności pomiaru u (za pomocą tzw. „Metody A”, szacowania niepewności standardowej za pomocą analizy statystycznej) [28], dla przypadków:

- gdy wykonano n ($2 < n < 10$) pomiarów:

$$u = \frac{k * s}{\sqrt{n}}, \quad (3.2)$$

gdzie:

k – współczynnik zależny od liczby pomiarów n (dla $n=5$ przyjęto $k=1,4$),

s – odchylenie standardowe,

n – liczba pomiarów,

- gdy wykonywano $n > 10$ pomiarów:

$$u = s / \sqrt{n}. \quad (3.3)$$

Wynik pomiaru przedstawia wtedy zależność:

$$\bar{x} = x \pm u, \quad (3.4)$$

gdzie:

x – średnia arytmetyczna wartość pomiaru,

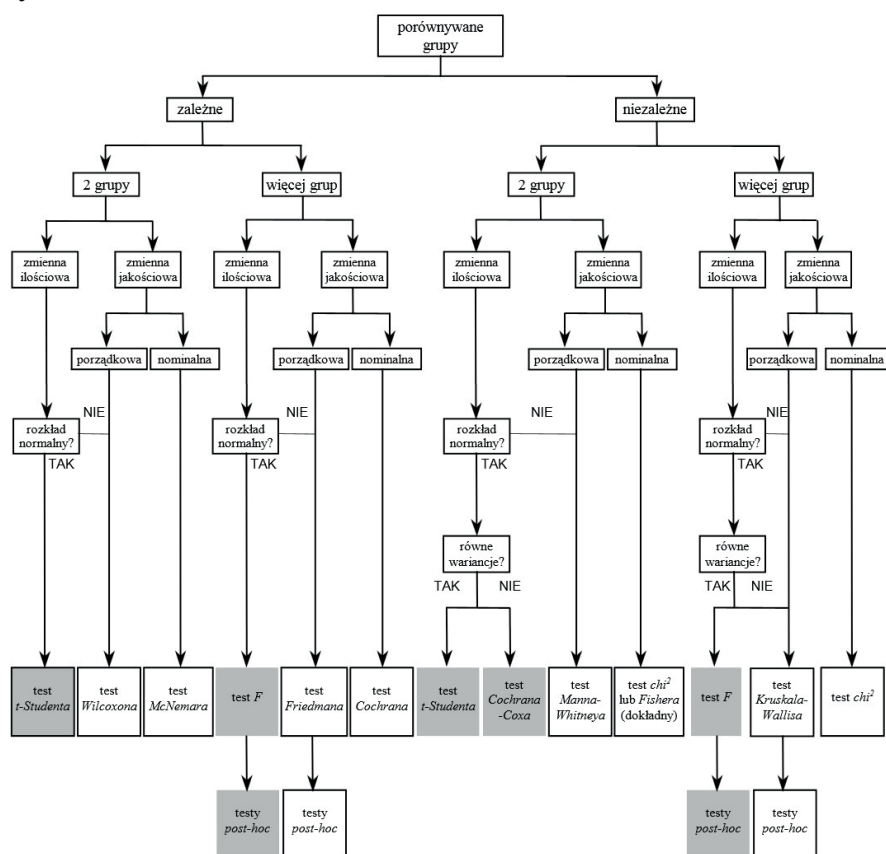
u – niepewność pomiaru.

Ponadto dla określonych warunków skrawania wykonano analizę istotności różnic, pomiędzy otrzymanymi wynikami pomiarów wskaźników skrawalności.

Do testowania wykorzystano tzw. statystyczne testy istotności. Wybór odpowiedniego testu podyktowany był faktem spełnienia lub niespełnienia założeń dotyczących danych, na podstawie których oceniana jest prawdziwość postawionej hipotezy. Przy wyborze najczęściej stosowanych testów pomocnym rozwiązaniem jest wykorzystanie uproszczonego schematu [112], podanego na rys. 3.14.

W przypadku analizowanych danych uzyskanych w badaniach własnych, dane te traktujemy, jako zmienne niezależne oraz ilościowe.

W celu weryfikacji uzyskanych wyników badań własnych, na przyjętym poziomie ufności $1-\alpha=0,95$ przyjęto schemat postępowania zgodny z podanym na rys. 3.14.



Rys. 3. 14. Schemat wyboru testów służących do oceny istotności różnic [112]

Pierwszym krokiem analizy było badanie normalności rozkładu, przy pomocy testu Shapiro-Wilka. W przypadku stwierdzenia braku zgodności rozkładu z rozkładem normalnym w dalszej analizie posłużono się testem Manna-Whitneya. Jeżeli jednak prowadzona analiza potwierdziła zgodność

z rozkładem normalnym, weryfikowano hipotezę o równości wariancji. Weryfikowano hipotezę zerową $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ wobec hipotezy alternatywnej $H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$. W przypadku potwierdzenia hipotezy zerowej o równości wariancji, do testowania hipotezy o równości wartości średnich przyjmowano test t-Studenta. Weryfikowano hipotezę zerową $H_0: \mu_1 = \mu_2$ wobec hipotezy alternatywnej $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$. W przypadku przeciwnym, tj. odrzucenia hipotezy zerowej o równości wariancji na rzecz hipotezy alternatywnej, do testowania hipotezy o równości wartości średnich stosowano test Cochran-Coxa [77, 110, 111, 112]. Testy statystyczne wykonano przy użyciu oprogramowania Statistica PL 10.

5. WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH

W rozdziale czwartym przedstawiono wyniki badań własnych skrawalności stopów magnezu, w aspekcie ryzyka zapłonu przy wysokiej wydajności i akceptowalnej chropowatości powierzchni oraz w oparciu o przyjęte wskaźniki skrawalności. Podczas realizacji badań wykorzystano metodykę badań opracowaną i przedstawioną w rozdziale trzecim.

5.1. Wyniki badań

Podczas obróbki frezowaniem stopów magnezu analizowano wskaźniki:

- jakość powierzchni po obróbce frezowaniem,
- mikrotwardość,
- siły oraz amplitudy sił skrawania,
- masa wiórów,
- czas do zapłonu wiórów,
- temperatura w strefie skrawania,
- morfologia wiórów ze stopów Mg.

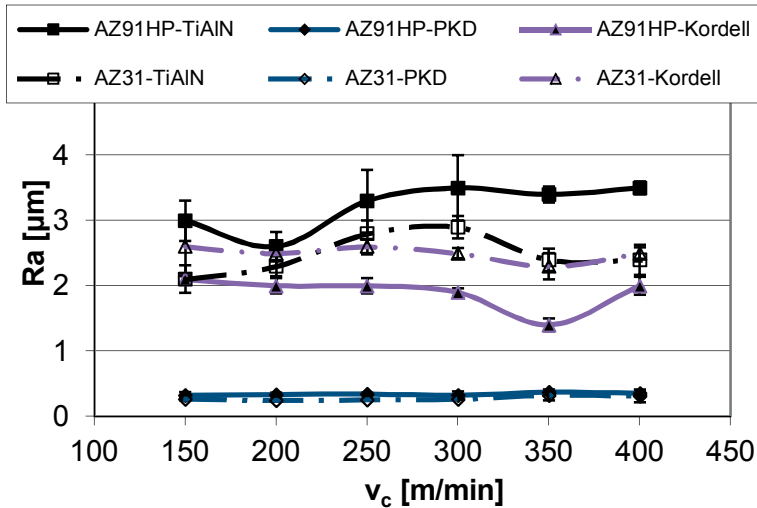
Uzyskane wyniki analizowano w kontekście celów głównych rozprawy ale także w kontekście pogłębienia i uporządkowania wiedzy w zakresie obróbki stopów magnezu. Jak potwierdzono w wyniku studium literatury wiedza ta jest raczej rozproszona, brak jest znaczących uogólnień noszących znamiona opracowania naukowego.

5.1.1. Wyniki badań chropowatości powierzchni po obróbce frezowaniem

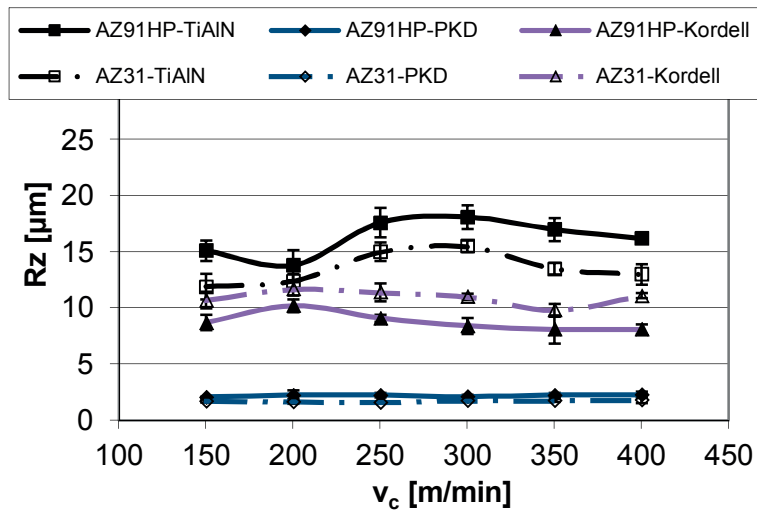
Analizowano wpływ parametrów technologicznych na chropowatość powierzchni. Wpływ zmiany prędkości skrawania analizowano w dwóch zakresach, głównie ze względu na charakterystykę wrzeciona obrabiarki. W zakresie zmiany $v_c=(150\div400)\text{m/min}$ badania prowadzono na centrum FV 580A, natomiast w zakresie zmiany $v_c=(500\div1200)\text{m/min}$ – Avia VMC800HS. Umownie przyjęto określenia: „obróbka konwencjonalna” dla badań prowadzonych na centrum FV 580A oraz „obróbka HSM” dla badań na centrum Avia VMC800HS.

Na rys. 4.1 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na jakość powierzchni po frezowaniu w przypadku zastosowania różnych narzędzi.

a)



b)

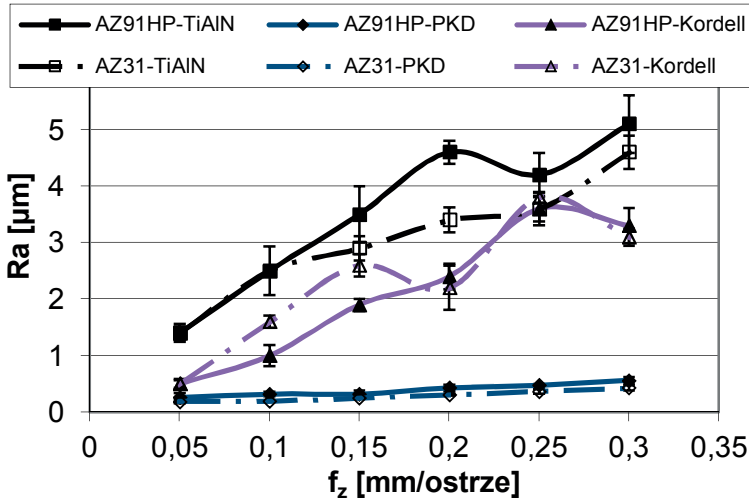


Rys. 4. 1. Wpływ prędkości skrawania v_c na chropowatość powierzchni: a) parametr Ra, b) parametr Rz (DIN); $v_c=300\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [80, 83]

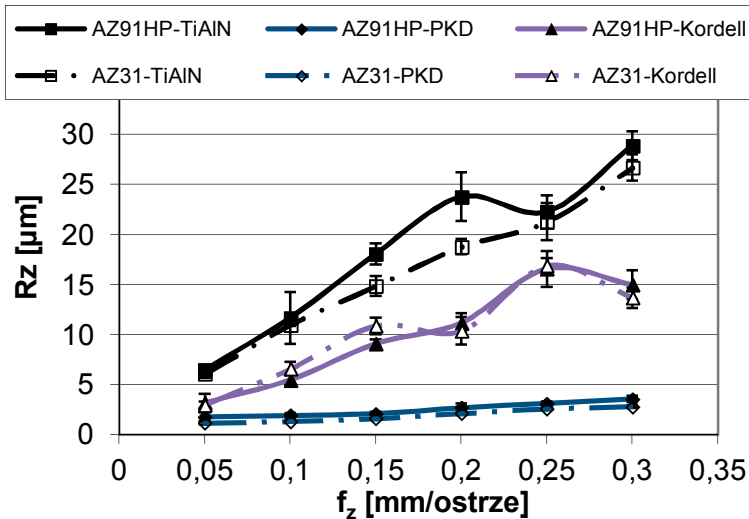
W zakresie zmiany $v_c=(150\div 400)\text{m/min}$ nie zaobserwowano istotnego wpływu v_c na jakość powierzchni obrobionej. Zarówno parametr Ra jak i Rz (DIN) zmieniały się w niewielkim zakresie, zwłaszcza w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD. Analiza statystyczna wyników dla narzędzia z ostrzem PKD zostanie przedstawiona w kolejnej części rozprawy. Widać jednak wyraźny wpływ rodzaju zastosowanego narzędzia na wartość chropowatości powierzchni.

Na rys. 4.2 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze, na jakość powierzchni po frezowaniu w przypadku zastosowania różnych narzędzi.

a)



b)



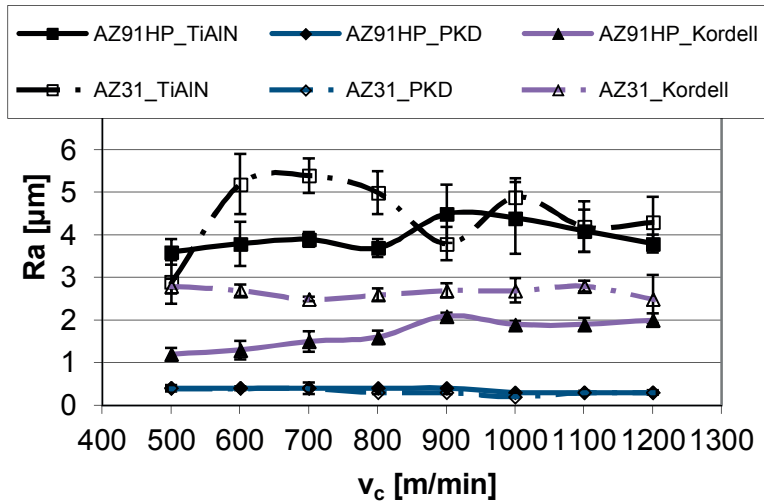
Rys. 4. 2. Wpływ posuwu na ostrze f_z na chropowatość powierzchni: a) parametr Ra, b) parametr Rz (DIN); $v_c=300\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [80, 83]

Analizując wpływ zmiany posuwu na ostrze f_z w przedstawionym zakresie, możemy zauważyć że w przypadku zastosowania narzędzi węglkowych (z powłoką TiAlN oraz o geometrii typu Kordell) wystąpił istotny wzrost chropowatości powierzchni po obróbce. Natomiast w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD wpływ ten jest znacznie mniejszy. Badania wskazują

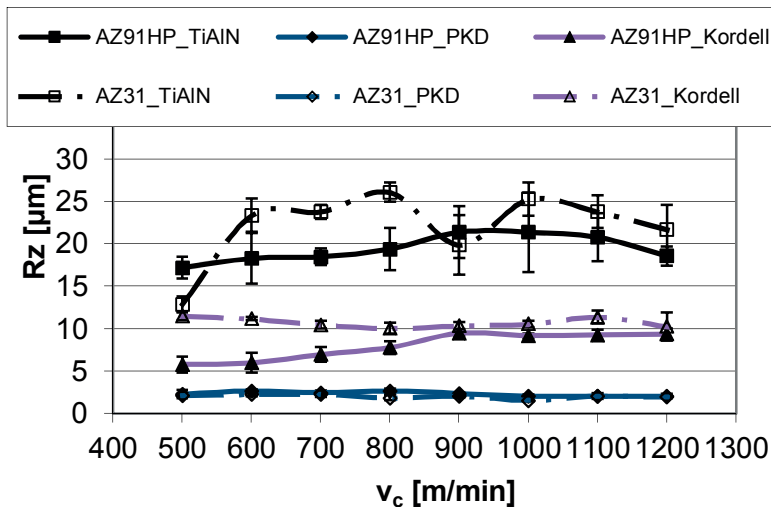
jak bardzo ważny jest dobór odpowiednich narzędzi do obróbki stopów Mg. Szczególnie ważna jest informacja, że dla wybranych narzędzi praktycznie nie zmienia się chropowatość w funkcji posuwu, jest to czynnik wskazujący na zalecany kierunek zmian parametrów skrawania w aspekcie poprawy objętościowej wydajności obróbki.

Na rys. 4.3 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na jakość powierzchni po frezowaniu w przypadku zastosowania różnych narzędzi.

a)



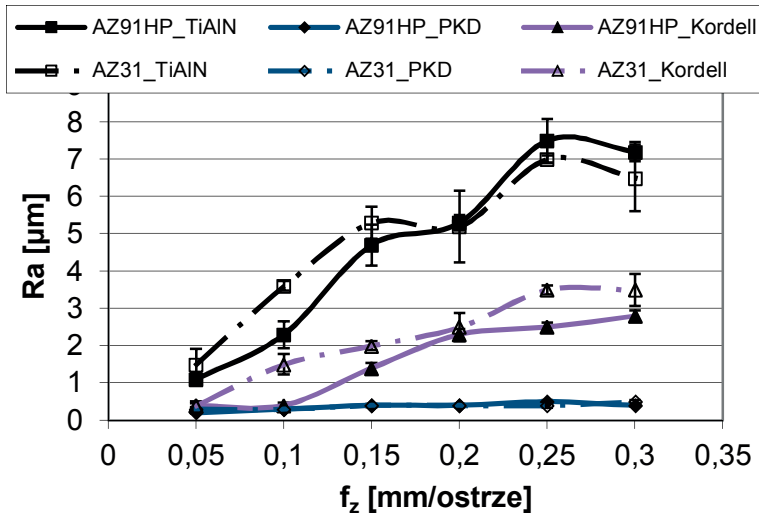
b)



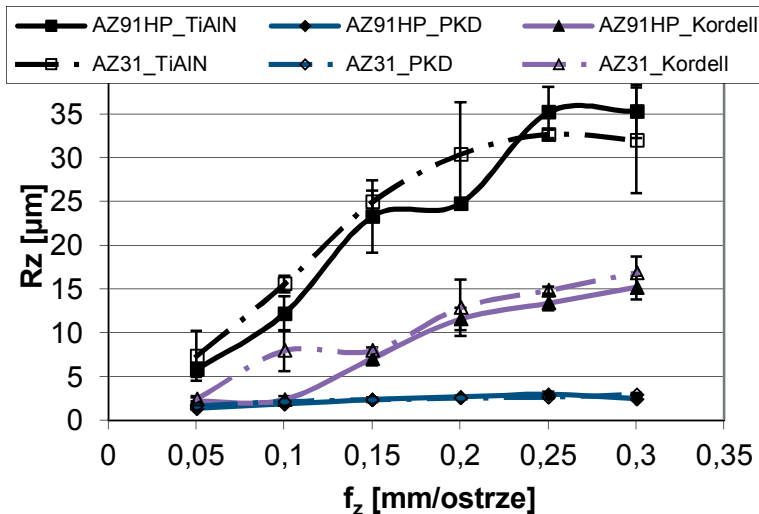
Rys. 4.3. Wpływ prędkości skrawania v_c na chropowatość powierzchni: a) parametr R_a , b) parametr R_z (DIN); $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [36]

W przedstawionym zakresie zmiany v_c obserwowano niewielki wpływ zmiany v_c na jakość powierzchni obrobionej. W przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD wpływ ten jest pomijalny na poziomie statystycznym (dokładna analiza przedstawiona w kolejnej części rozprawy). To dowodzi, że prędkość skrawania może być zmieniana w bardzo szerokim zakresie bez obawy o negatywne skutki jakości powierzchni. Na rys. 4.4 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze na jakość powierzchni po frezowaniu w przypadku zastosowania różnych narzędzi.

a)



b)

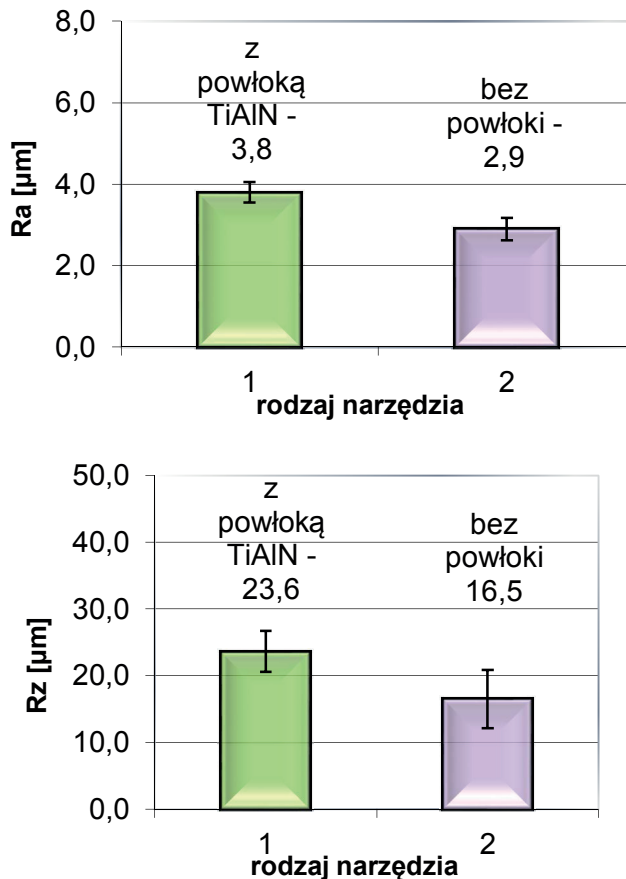


Rys. 4. 4. Wpływ posuwu na ostrze f_z na chropowatość powierzchni: a) parametr Ra, b) parametr Rz (DIN); $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [36]

Podobnie jak w przypadku badań wpływu zmiany posuwu dla zakresu tzw. „obróbki konwencjonalnej” obserwowano istotny wzrost chropowatości powierzchni obrabianej (dla narzędzi z powłoką TiAlN oraz o geometrii typu Kordell). Wpływ ten jest w zasadzie pomijalny w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD.

W celach porównawczych analizowano wpływ obecności powłoki TiAlN, na jakość powierzchni po obróbce. Na rys. 4.5 przedstawiono wpływ obecności powłoki na parametry chropowatości powierzchni obrabianej Ra oraz Rz. Porównano jakość powierzchni po frezowaniu w przypadku zastosowania dwóch narzędzi:

- frezu węglowego z powłoką TiAlN (narzędzie nr 1),
- frezu węglowego bez powłoki (narzędzie nr 2).



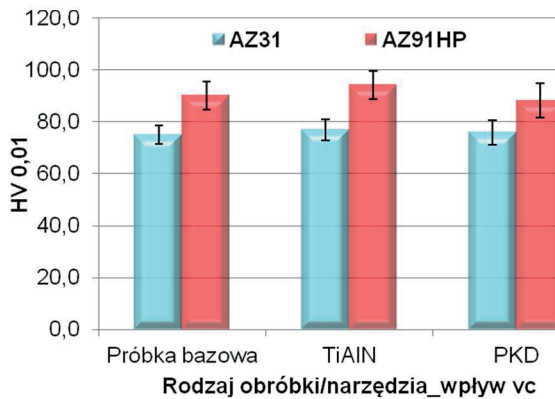
Rys. 4. 5. Badania porównawcze wpływu narzędzia z powłoką TiAlN i bez powłoki na jakość powierzchni po obróbce; $v_c=400\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [36]

Wyniki badań przedstawione na rys. 4.5 pozwalają zauważyć, że niższe wartości parametrów chropowatości powierzchni po obróbce uzyskano w przypadku zastosowania narzędzia bez powłoki. Nie są to jednak wartości technologicznie istotne. Obecność powłoki TiAlN powoduje wzrost parametrów chropowatości powierzchni, co jest związane prawdopodobnie z pogorszeniem „ostrości” (zaokrągleniem) krawędzi skrawającej po procesie powlekania.

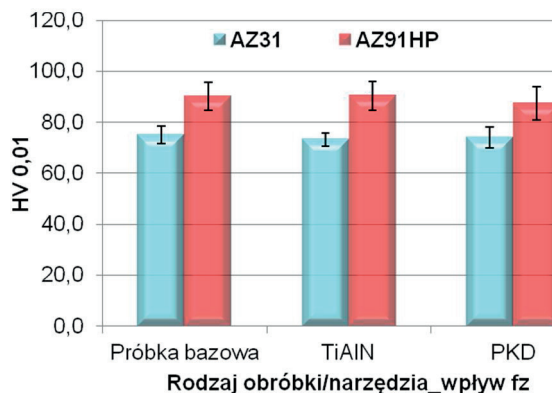
5.1.2. Wyniki badań mikrotwardości

W celu oceny wpływu maksymalnych wartości parametrów technologicznych na stopień umocnienia warstwy wierzchniej wykonano badania porównawcze mikrotwardości powierzchni (rys. 4.6) oraz mikrotwardości warstwy wierzchniej (rys. 4.7–4.9).

a)



b)

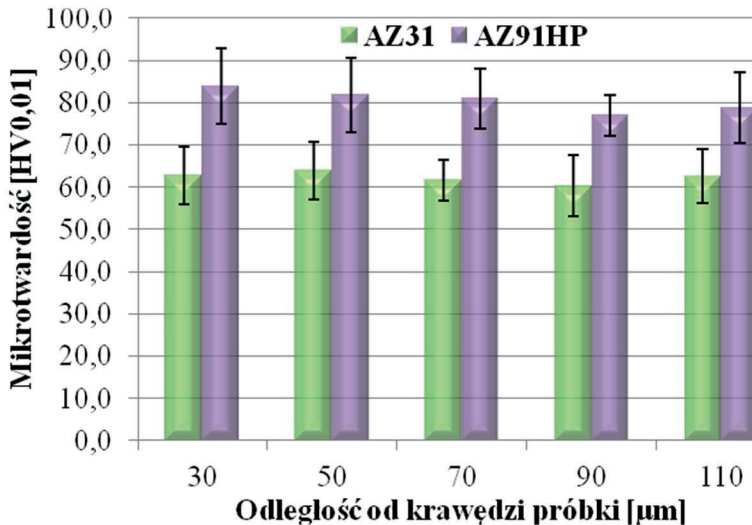


Rys. 4. 6. Wpływ parametrów obróbki frezowaniem na mikrotwardość powierzchni po frezowaniu: a) wpływ prędkości skrawania: próbka bazowa ($v_c=150\text{m/min}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, $a_p=0,5\text{mm}$), TiAlN/PKD $v_c=1200\text{m/min}$ ($f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$); b) wpływ posuwu 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 $f_z=0,3\text{mm/ostre}$ ($v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$) [79]

Jak wynika z rys. 4.6 nie stwierdzono istotnego wpływu maksymalnych (w analizowanym eksperymencie) parametrów technologicznych (v_c oraz f_z) oraz rodzaju materiału narzędzia na mikrotwardość powierzchni. Niewielkie różnice mikrotwardości powierzchni po obróbce różnymi narzędziami są w zasadzie z technologicznego punktu widzenia nieistotne.

W kolejnym etapie przeprowadzono pomiary mikrotwardości na zglądach poprzecznych, w celu oceny wpływu zastosowanych parametrów technologicznych na stopień umocnienia warstwy wierzchniej.

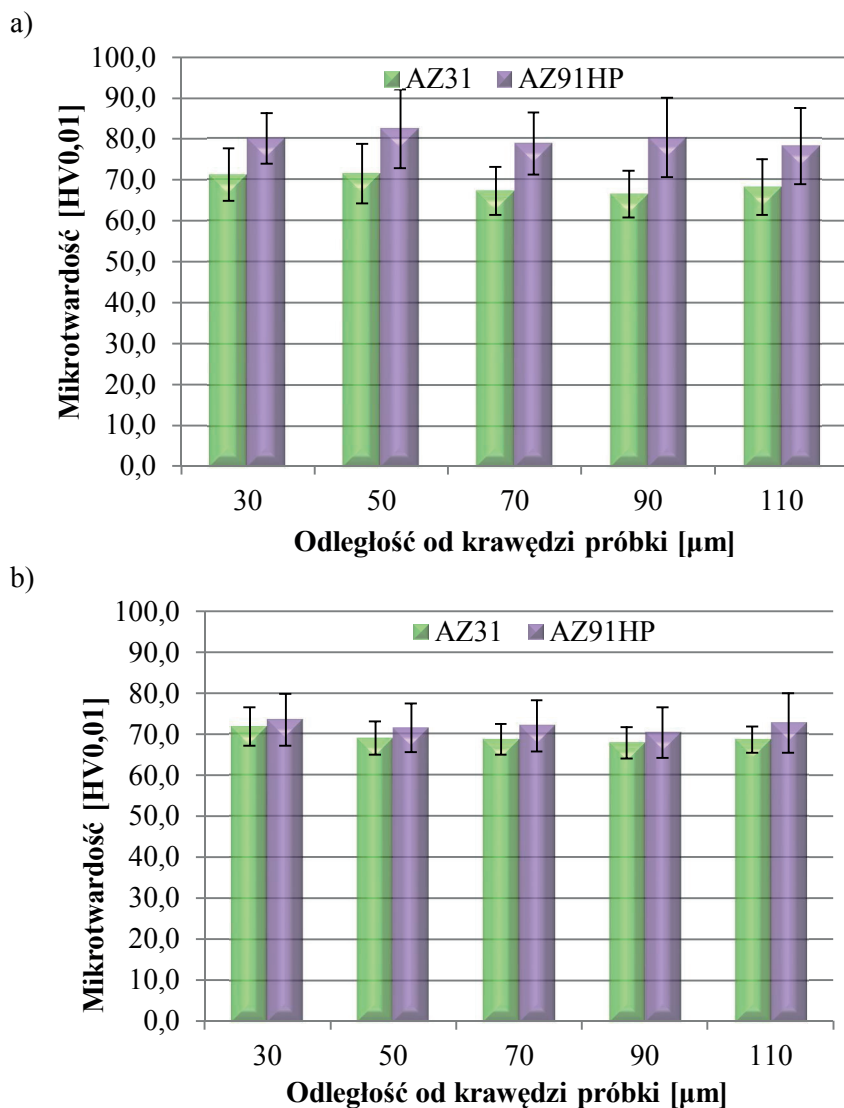
Na rysunkach (4.7÷4.9) przedstawiono mikrotwardość warstwy wierzchniej stopów magnezu w przypadku zastosowania różnych typów narzędzi oraz maksymalnych, w analizowanym eksperymencie, parametrów technologicznych frezowania. Na rys. 4.7 przedstawiono mikrotwardość tzw. próbki „bazowej”. Aby zminimalizować wpływ warunków skrawania, próbki (w tym przypadku) wykonano z minimalnymi wartościami parametrów obróbki.



Rys. 4. 7. Mikrotwardość próbki „bazowej”, parametry obróbki: $a_p=0,5\text{mm}$
 $v_c=150\text{m/min}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$

Z rys. 4.7 wynika, że średnia mikrotwardość w przekroju poprzecznym próbki wyniosła odpowiednio: w przypadku stopu AZ91HP ok.80HV, w przypadku stopu AZ31 ok.60HV.

Na rys. 4.8 przedstawiono mikrotwardość po frezowaniu narzędziem węglkowym z powłoką TiAlN. Rysunek ten przedstawia mikrotwardość w funkcji odległości od krawędzi próbki. Na rys. 4.8a przedstawiono wartość mikrotwardości dla $v_c=1200\text{m/min}$ oraz $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, na rys. 4.8b przedstawiono wartość mikrotwardości dla $f_z=0,3\text{mm/ostre}$ oraz $v_c=800\text{m/min}$. Głębokość skrawania a_p była jednakowa dla obu wariantów.



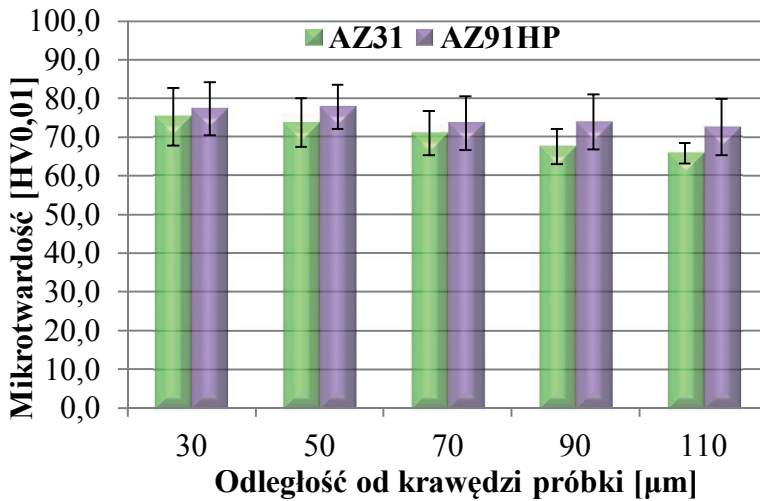
Rys. 4. 8. Mikrotwardość warstwy wierzchniej stopów magnezu w przypadku frezowania narzędziem węglkowym z powłoką TiAlN: a) prędkość skrawania $v_c=1200\text{m/min}$ ($f_z=0,15\text{mm/strze}$, $a_p=6\text{mm}$), b) posuw na ostrze $f_z=0,3\text{mm/strze}$ ($v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$)

Z analizy rys. 4.8a wynika, że wyższymi wartościami mikrotwardości warstwy wierzchniej charakteryzował się stop AZ91HP, w przypadku którego nie zaobserwowano wzrostu mikrotwardości warstwy wierzchniej, w porównaniu do mikrotwardości tzw. próbki „bazowej”. Analizując natomiast rys. 4.8b zauważyć można, że mikrotwardość stopu AZ31 jest wyższa niż w przypadku

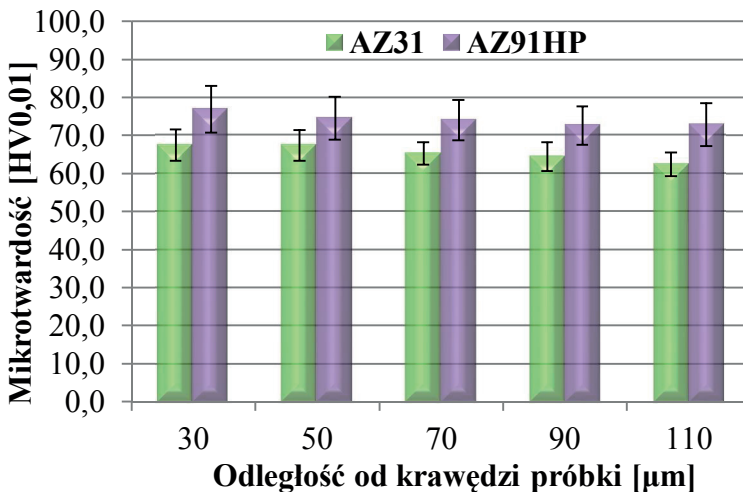
próbki „bazowej”, natomiast w przypadku stopu AZ91HP wystąpił nieznaczny spadek mikrotwardości warstwy wierzchniej.

Na rys. 4.9 przedstawiono mikrotwardość po frezowaniu narzędziem z ostrzem PKD. Rysunek ten przedstawia mikrotwardość w funkcji odległości od krawędzi próbki. Na rys. 4.9a przedstawiono wartość mikrotwardości dla $v_c=1200\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, na rys. 4.9b wartość mikrotwardości dla $f_z=0,3\text{mm/ostre}$, $v_c=800\text{m/min}$. Również w tym przypadku głębokość skrawania a_p była jednakowa dla obu wariantów.

a)



b)



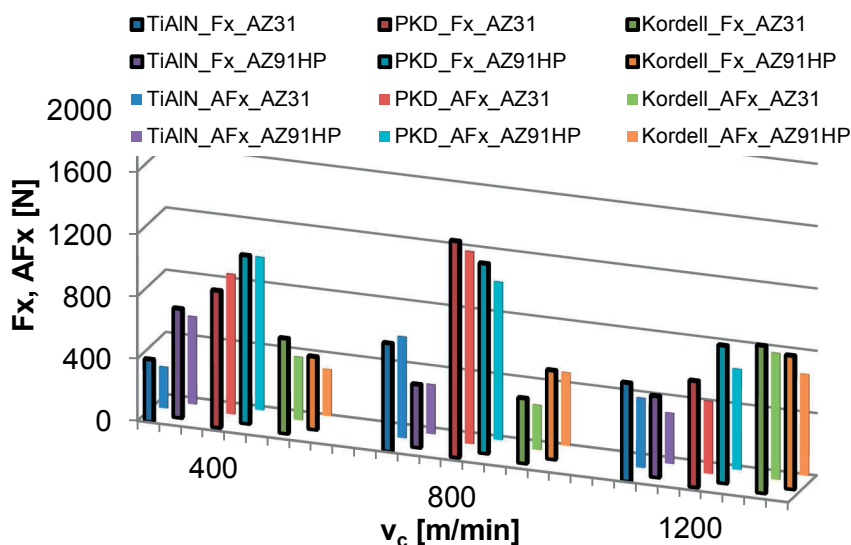
Rys. 4. 9. Mikrotwardość warstwy wierzchniej stopów magnezu w przypadku frezowania narzędziem z ostrzem PKD: a) prędkość skrawania $v_c=1200\text{m/min}$ ($f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$), b) posuw na ostrze $f_z=0,3\text{mm/ostre}$ ($v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$)

Przy prędkości skrawania $v_c=1200\text{m/min}$ (patrz rys. 4.9a) oraz stopu AZ91HP widoczny jest nieznaczny spadek mikrotwardości, obserwowany w przekroju poprzecznym próbki, w porównaniu do mikrotwardości próbki „bazowej”. Mikrotwardość stopu AZ31 jest wyższa niż dla próbki „bazowej”. Analizując rys. 4.9b zauważyć możemy, że średnia wartość mikrotwardości w przypadku stopu AZ31 pozostaje na podobnym poziomie jak w przypadku próbki „bazowej”, w przypadku stopu AZ91HP – jest to wartość niższa o ok. 5HV w porównaniu do próbki „bazowej”. Generalnie można stwierdzić, że stopień umocnienia warstwy wierzchniej, mierzony wartością mikrotwardości, nie zmienia się w sposób istotny w całym zakresie technologicznych parametrów skrawania. Jest to istotne stwierdzenie, na tej podstawie można wnioskować, że strefa odkształcenia plastycznego dla warunków obróbki wysokowydajnej nie zmienia się istotnie w stosunku do obróbki z niewielkimi przekrojami warstwy skrawanej.

5.1.3. Wyniki badań sił skrawania oraz ich amplitud

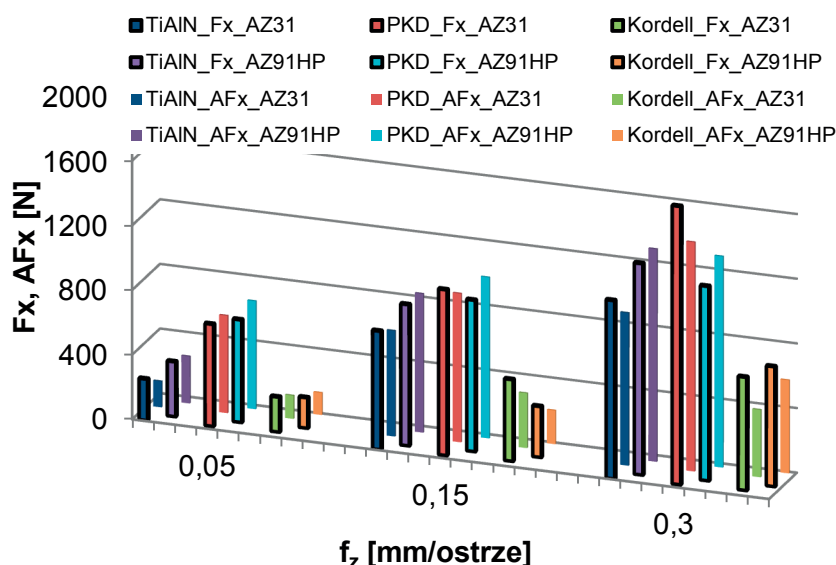
Analizowano wpływ parametrów technologicznych na siły oraz amplitudy sił w strefie skrawania. Przedstawione na rys. (4.10÷4.15) wyniki dotyczą frezowania w zakresie parametrów technologicznych: $v_c=(400\div1200)\text{m/min}$, $f_z=(0,05\div0,3)\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$. Na rys. 4.10 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na składową F_x oraz jej amplitudę AF_x podczas frezowania.

Jak łatwo zauważyć, w przypadku zastosowania narzędzi z tzw. „klasyczną geometrią” występuje charakterystyczne przejście w stan obróbki HSM (rys. 4.10), charakteryzujące się spadkiem sił skrawania. Sytuacja taka ma miejsce dla narzędzia węglkowego z powłoką TiAlN oraz z ostrzem PKD. Dla narzędzia węglkowego z geometrią typu Kordell ma miejsce sytuacja odwrotna.



Rys. 4. 10. Wpływ prędkości skrawania v_c na wartość składowej F_x siły skrawania oraz jej amplitudy AF_x ; $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [81]

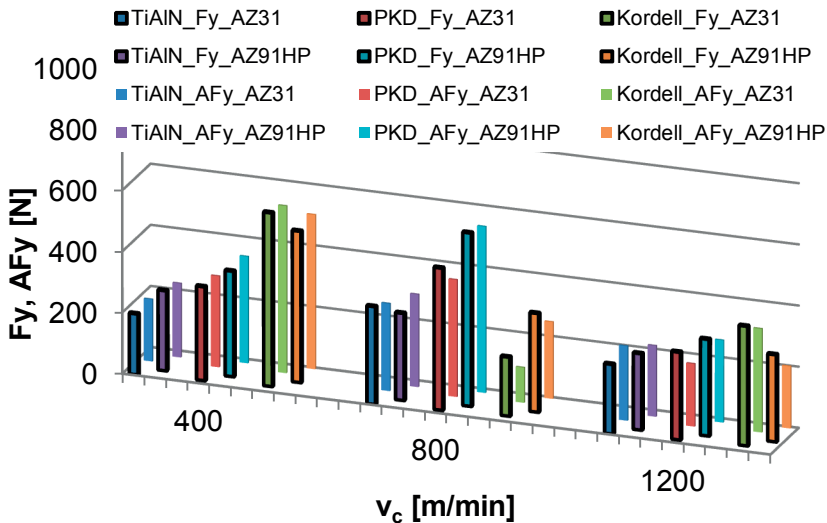
Na rys. 4.11 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze na składową F_x oraz jej amplitudę AF_x podczas frezowania. Wzrost wartości posuwu na ostrze (rys. 4.11) wpływa na wzrost składowej siły skrawania F_x oraz jej amplitudy AF_x dla wszystkich typów narzędzi oraz stopów Mg.



Rys. 4. 11. Wpływ posuwu na ostrze f_z na wartość składowej F_x siły skrawania oraz jej amplitudy AF_x ; $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [81]

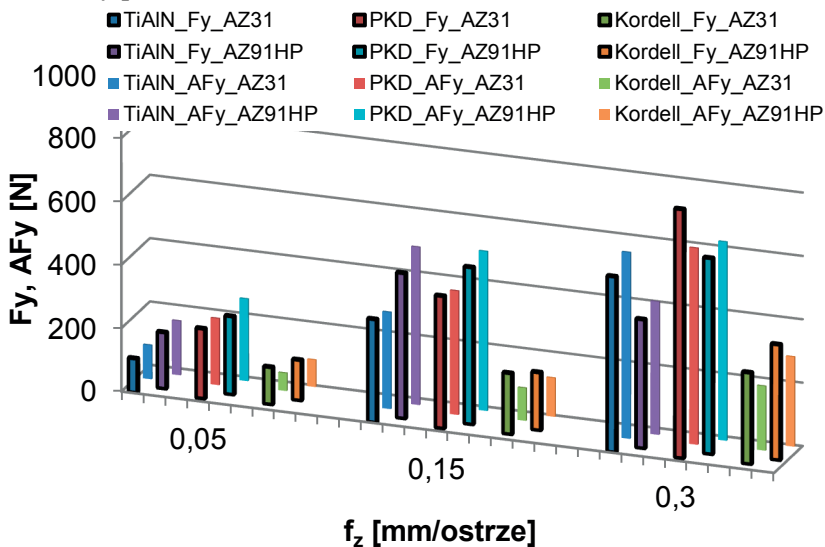
5.1 Wyniki badań

Na rys. 4.12 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na składową F_y oraz jej amplitudę AF_y podczas frezowania.



Rys. 4. 12. Wpływ prędkości skrawania v_c na wartość składowej F_y siły skrawania oraz jej amplitudy AF_y ; $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [81]

Na rys. 4.13 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze f_z na składową F_y oraz jej amplitudę AF_y podczas frezowania.

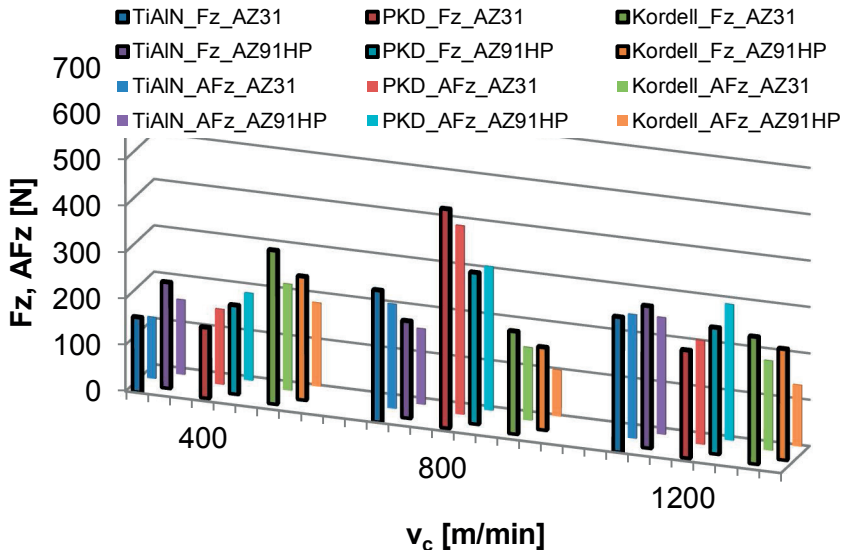


Rys. 4. 13. Wpływ posuwu na ostrze f_z na wartość składowej F_y siły skrawania oraz jej amplitudy AF_y ; $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [81]

Podobnie dla składowej F_x , zwiększanie prędkości skrawania (rys. 4.12) powoduje wzrost, a następnie spadek składowej F_y oraz jej amplitudy AF_y , przy przejściu w obszar obróbki HSM. Sytuacja taka ma miejsce dla narzędzi charakteryzujących się „klasyczną geometrią” ostrza narzędzia.

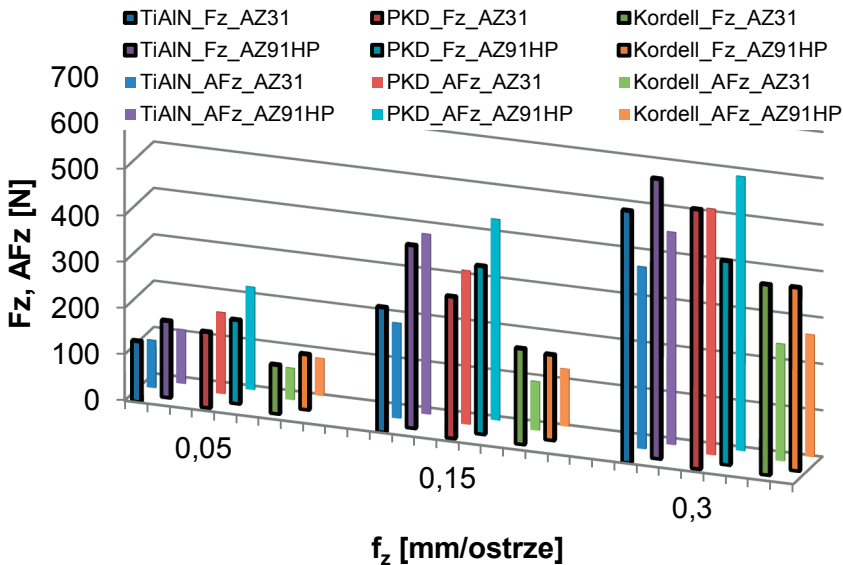
Zwiększanie posuwu na ostrze (rys. 4.13) powoduje wzrost składowej F_y oraz jej amplitudy AF_y (w większości przypadków). Wyjątkiem jest próba z wykorzystaniem narzędzia węglowego z powłoką TiAlN oraz stopu AZ91HP. W tym przypadku następuje wzrost, a następnie spadek składowej oraz jej amplitudy.

Na rys. 4.14 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na składową F_z oraz jej amplitudę AF_z podczas frezowania. Podobnie jak we wcześniejszych przypadkach (F_x , F_y) również składowa F_z oraz jej amplituda AF_z (rys. 4.14) maleją po przekroczeniu pewnej granicy prędkości w przypadku narzędzia z ostrzem PKD. W pozostałych przypadkach ma miejsce sytuacja odwrotna.



Rys. 4. 14. Wpływ prędkości skrawania v_c na wartość składowej F_z siły skrawania oraz jej amplitudy AF_z ; $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [81]

Na rys. 4.15 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze na składową F_z oraz jej amplitudę AF_z podczas frezowania.



Rys. 4. 15. Wpływ posuwu na ostrze f_z na wartość składowej F_z siły skrawania oraz jej amplitudy AF_z ; $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [81]

Wraz ze wzrostem posuwu na ostrze (rys. 4.15) obserwowano wzrost składowej F_z oraz jej amplitudy AF_z w całym zakresie zmiany posuwu.

Obserwując zmianę v_c zauważyć możemy stan przejścia w zakres obróbki HSM. Wzrost f_z powoduje wzrost składowych sił skrawania oraz ich amplitud.

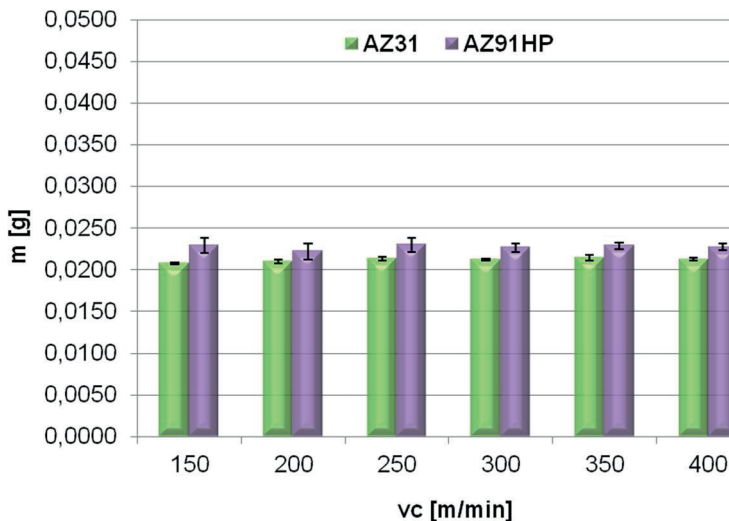
W zakresie analizowanych parametrów skrawania większy wpływ na siły skrawania oraz ich amplitudy, wykazuje posuw na ostrze f_z niż prędkość skrawania v_c . W większości przypadków, wyższe wartości sił skrawania obserwowano w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD. W przypadku zmiany prędkości skrawania v_c , najwyższe wartości składowych sił skrawania F_x , F_y oraz F_z wystąpiły (w większości przypadków) przy $v_c=800\text{m/min}$. Zależność ta dotyczy narzędzi z tzw. "klasyczną geometrią" ostrza. Interesujący jest fakt spadku składowych sił skrawania przy wzroście prędkości skrawania do $v_c=1200\text{m/min}$, w przypadku narzędzi z tzw. "klasyczną geometrią" ostrza. Wzrost posuwu na ostrze powoduje w przybliżeniu liniowy przyrost składowych sił skrawania oraz ich amplitud. Nie zaobserwowano znacznych różnic w wartości sił skrawania dla stopów AZ31 i AZ91HP przy zmianie posuwu na ostrze f_z . Różnice te występowały natomiast w przypadku zmiany prędkości skrawania v_c .

5.1.4. Wyniki badań masy wiórów ze stopów Mg

W kolejnym etapie badań analizowano wpływ parametrów technologicznych na masę jednostkową wiórów. Jest to ważny symptom poprawności przyjętych parametrów technologicznych obróbki w kontekście możliwości samozapłonu wiórów. Przedstawione na rys. (4.16÷4.26) wykresy dotyczą frezowania dla następującego zakresu parametrów technologicznych: $v_c=(150\div400)\text{m/min}$, $f_z=(0,05\div0,3)\text{mm/ostre}$, $a_p=(0,5\div3)\text{mm}$.

Na rys. 4.16 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na masę wióra po frezowaniu w przypadku zastosowania narzędzia węglowego z powłoką TiAlN.

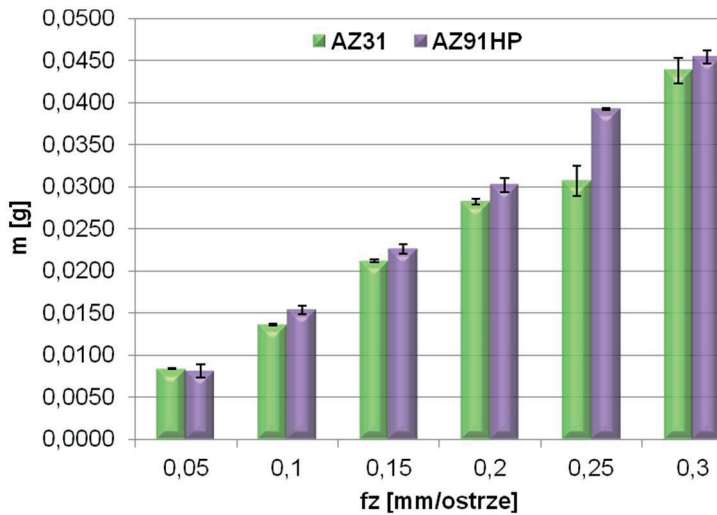
Jak można zaobserwować na rys. 4.16 zmiana prędkości skrawania v_c w przedstawionym zakresie nie wpływa na średnią masę jednostkową wióra. Dodatkowo w analizowanym zakresie nie powstają frakcje pośrednie wiórów. Ma to istotny wpływ na bezpieczeństwo realizowanego procesu frezowania na sucho z zastosowaniem narzędzia węglowego z powłoką TiAlN.



Rys. 4. 16. Wpływ prędkości skrawania v_c na średnią masę jednostkową wióra:
 $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [37]

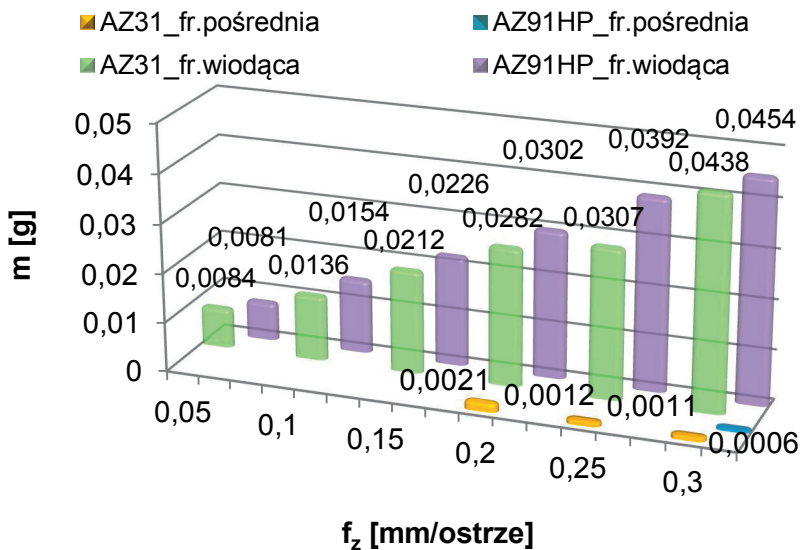
Na rys. 4.17 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze, na masę wióra po frezowaniu narzędziem węglowym z powłoką TiAlN.

Analizując wpływ posuwu na ostrze f_z (rys. 4.17) zauważyć można wzrost średniej masy wióra, co jest oczywiste, wraz ze wzrostem przekroju warstwy skrawanej. Jest to wzrost wprost proporcjonalny, w przybliżeniu liniowy, wynika stąd, że zwiększanie posuwu nie implikuje wprost zjawiska fragmentowania wiórów.



Rys. 4. 17. Wpływ posuwu na ostrze f_z na średnią masę jednostkową wióra:
 $v_c=300\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [37]

Na rys. 4.18 przedstawiono wpływ wartości posuwu na powstawanie pośrednich frakcji wiórów. Podziału na frakcje dokonano zgodnie z zasadami podanymi w rozdziale 3.1.4 Metodyka badań masy wiórów ze stopów Mg.



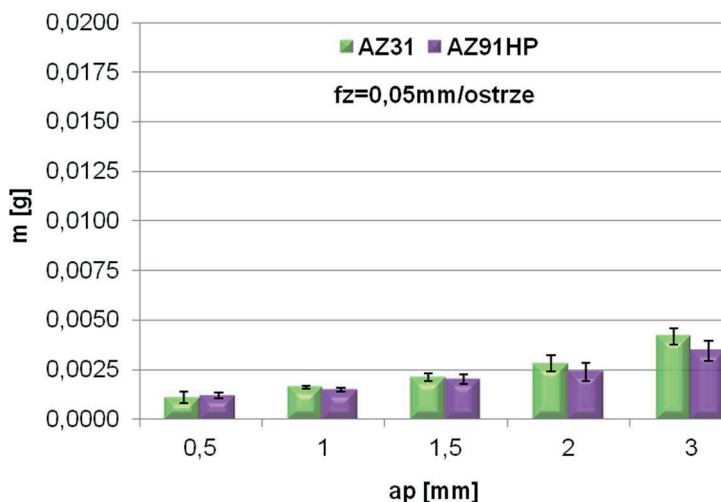
Rys. 4. 18. Wpływ posuwu na ostrze f_z na powstawanie pośrednich frakcji wiórów [37]

Podczas zmiany posuwu na ostrze f_z (rys. 4.18), z zastosowaniem narzędzia węglowego z powłoką TiAlN występuje sporadycznie fragmentowanie

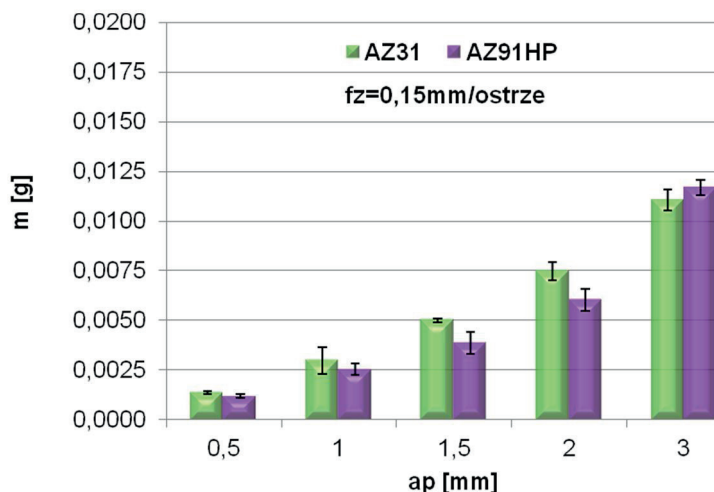
wiórów (występują frakcje pośrednie wiórów). Zjawisko to ma miejsce w dwóch obszarach: dla stopu AZ31 w zakresie $f_z=(0,2\div0,3)\text{mm/ostre}$, występuje jedna frakcja pośrednia oraz dla stopu AZ91HP w zakresie $f_z=0,3\text{mm/ostre}$.

Na rys. 4.19 przedstawiono wpływ głębokości skrawania na masę wióra po frezowaniu w przypadku zastosowania narzędzia węglowego z powłoką TiAlN.

a)



b)

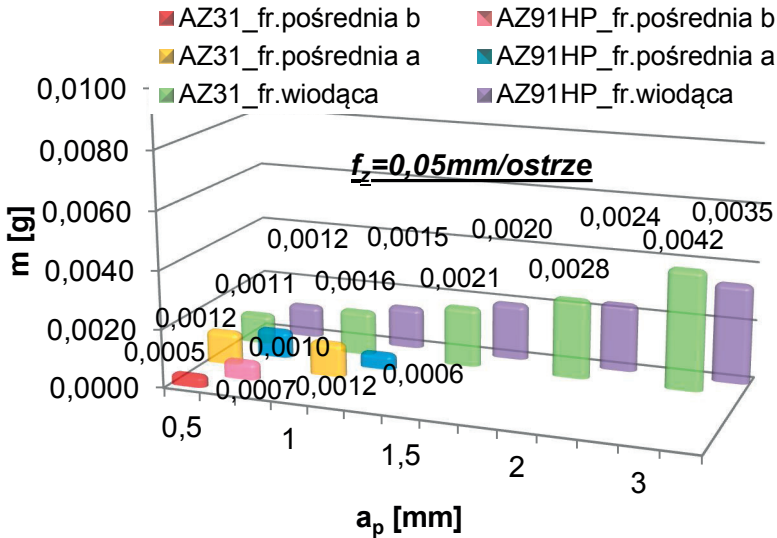


Rys. 4. 19. Wpływ głębokości skrawania a_p na średnią masę jednostkową wióra: a) $f_z=0,05\text{mm/ostre}$; b) $f_z=0,15\text{mm/ostre}$; $v_c=300\text{m/min}$ [37]

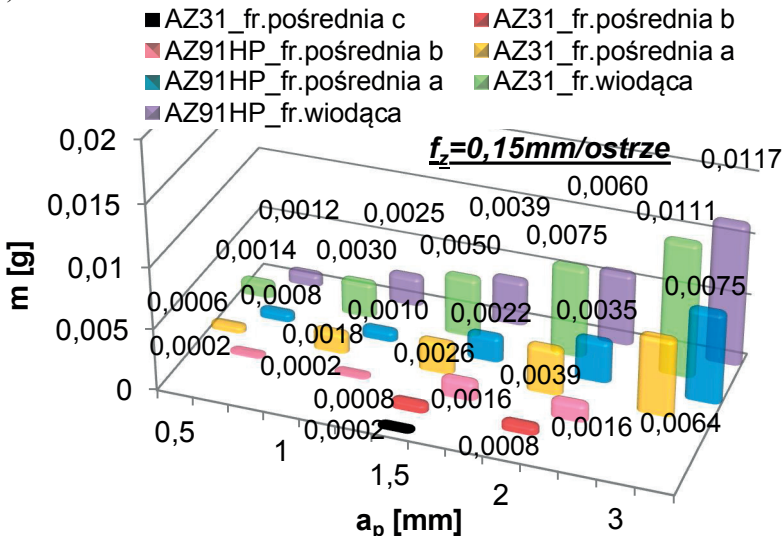
Wraz ze wzrostem głębokości skrawania a_p (rys. 4.19) zaobserwowano wzrost średniej masy wióra frakcji wiodącej, zarówno w przypadku minimalnej jak i średniej wartości posuwu. Występuje proporcjonalny przyrost masy wióra wraz ze zwiększaniem a_p .

Na rys. 4.20 przedstawiono wpływ głębokości skrawania na powstawanie pośrednich frakcji wiórów.

a)



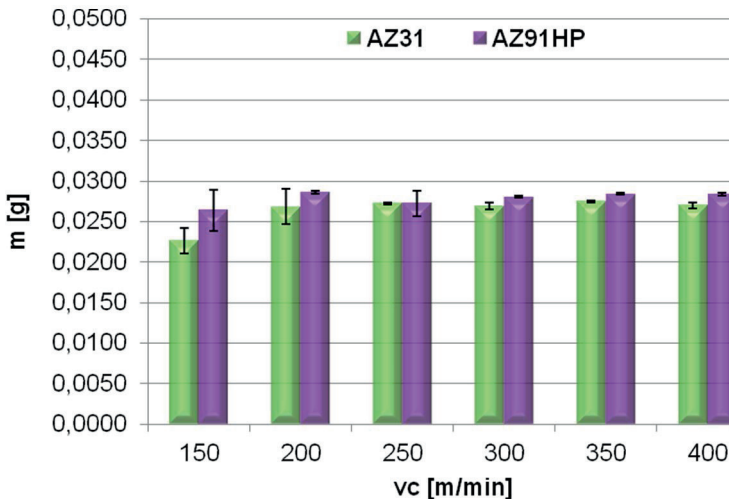
b)



Rys. 4. 20. Wpływ głębokości skrawania a_p na powstawanie pośrednich frakcji wiórów:
a) $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, b) $f_z=0,15\text{mm/ostre}$ [37]

Podczas zmiany głębokości skrawania (rys. 4.20) występuje fragmentowanie wiórów. Zjawisko to dla wartości posuwu $f_z=0,05\text{mm/ostre}$ ma miejsce w dwóch obszarach: dla obydwu stopów magnezu AZ31 i AZ91HP w zakresie $a_p=0,5\text{mm}$ oraz $a_p=1\text{mm}$. Dla wartości posuwu $f_z=0,15\text{mm/ostre}$ fragmentowanie wiórów ma miejsce w całym zakresie analizowanej głębokości skrawania, tj. $a_p=(0,5\div 3)\text{mm}$. Z przedstawionych danych wynika, iż należy unikać skrawania z małymi głębokościami skrawania, tj. dla $f_z=0,05\text{mm/ostre}$ a_p nie powinno być mniejsze niż $1,5\text{mm}$, dla $f_z=0,15\text{mm/ostre}$ – poniżej 3mm . Głębokość skrawania jest najbardziej skorelowana ze zjawiskiem fragmentowania wiórów.

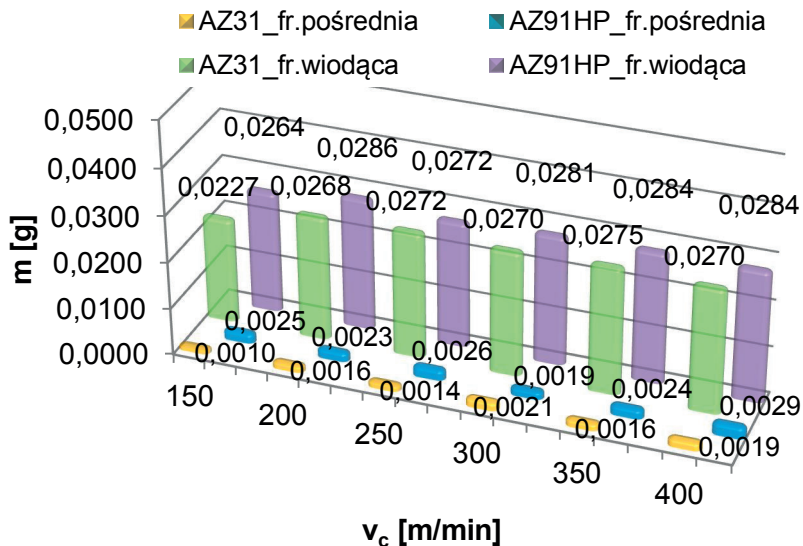
Na rys. 4.21 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na masę wióra frakcji wiodącej po frezowaniu w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD.



Rys. 4. 21. Wpływ prędkości skrawania v_c na średnią masę jednostkową wióra:
 $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$

Podobnie jak w przypadku zastosowania narzędzia węglkowego z powłoką TiAlN, w przypadku narzędzia z ostrzem PKD (rys. 4.21) nie zaobserwowano istotnych różnic zmiany masy frakcji wiodącej wiórów podczas zmiany prędkości skrawania v_c . Zmiana prędkości skrawania v_c nie wpływa na średnią masę wióra frakcji wiodącej.

Na rys. 4.22 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na powstawanie pośrednich frakcji wiórów.

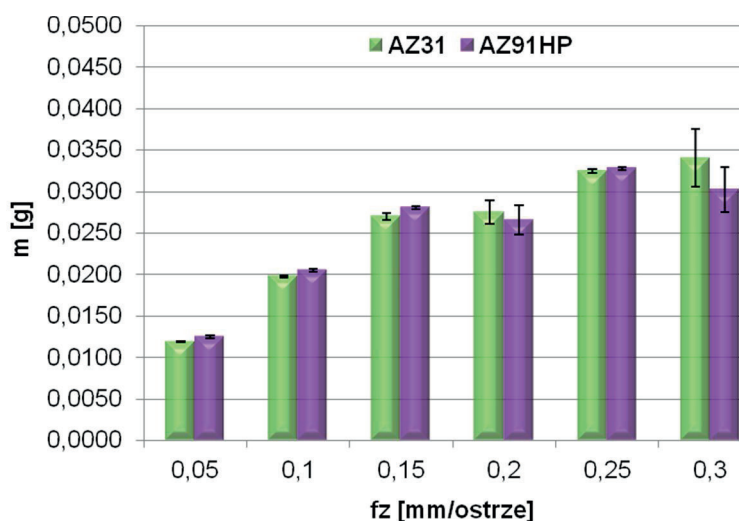


Rys. 4. 22. Wpływ prędkości skrawania v_c na powstawanie pośrednich frakcji wiórów

Zmiana prędkości skrawania (rys. 4.22), z zastosowaniem narzędzia z ostrzem PKD wpływa na fragmentowanie wiórów, jest to obserwowane bardziej zdecydowanie niż w przypadku zastosowania narzędzia z powłoką TiAlN. Zjawisko to ma miejsce w całym zakresie zmiany prędkości skrawania $v_c=(150\div400)\text{m/min}$. Jest to zjawisko niekorzystne ze względu na możliwość zanieczyszczenia ważnych układów roboczych maszyny przez drobne frakcje wiórów oraz ryzyko zapłonu frakcji pośrednich (mniejsze wióry są bardziej podatne na zapłon podczas obróbki).

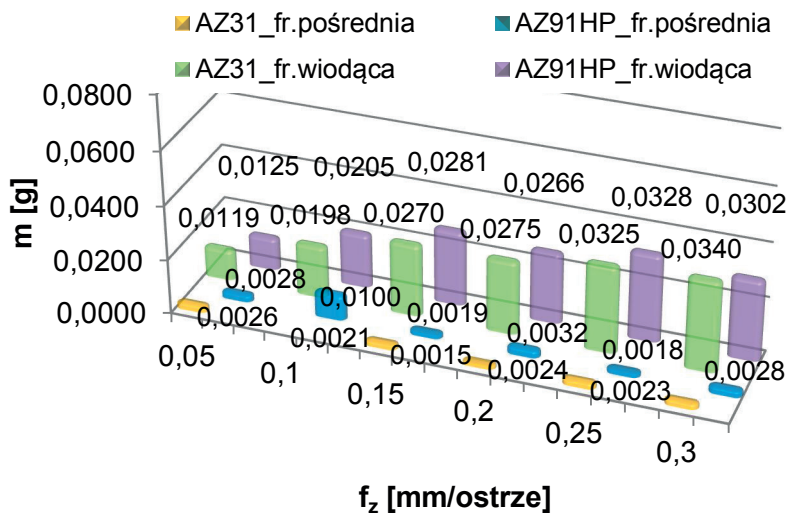
Na rys. 4.23 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze, na masę wióra po frezowaniu, w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD.

Analizując wpływ posuwu na ostrze f_z podczas frezowania narzędziem z ostrzem PKD zauważyć możemy dwie tendencje (patrz rys. 4.23). Mianowicie dla stopu AZ31 występuje tendencja wzrostowa masy wióra w całym zakresie zmiany posuwu, dla stopu AZ91HP występuje wzrost masy wióra w zakresie $f_z=(0,05\div0,15)\text{mm/ostrze}$, a następnie wahania masy w zakresie $f_z=(0,2\div0,3)\text{mm/ostrze}$, a więc silniej występuje w tym zakresie zjawisko fragmentowania dla tego stopu..



Rys. 4. 23. Wpływ posuwu na ostrze f_z na średnią masę jednostkową wióra:
 $v_c=300\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$

Na rys. 4.24 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze, na powstawanie pośrednich frakcji wiórów.

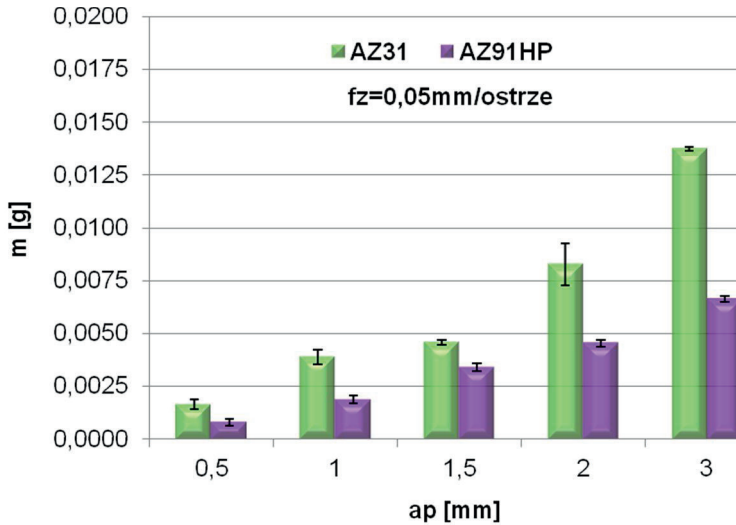


Rys. 4. 24. Wpływ posuwu na ostrze f_z na powstawanie pośrednich frakcji wiórów

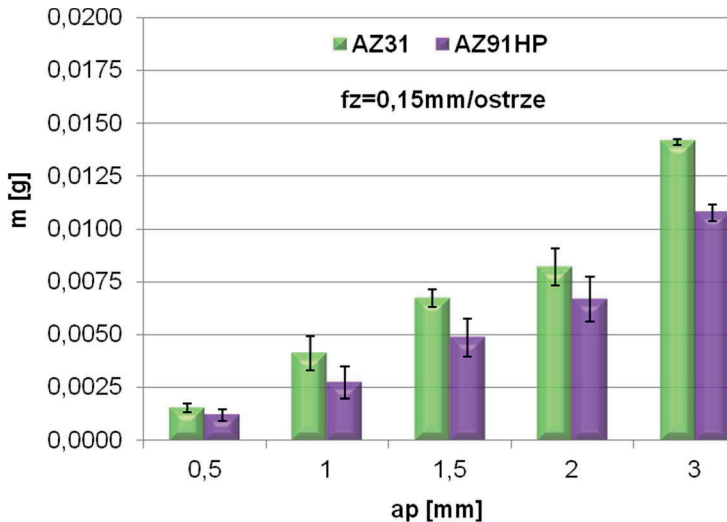
Zmiana posuwu na ostrze (rys. 4.24) wpływa na fragmentowanie wiórów. Zjawisko to ma miejsce w całym zakresie zmiany posuwu na ostrze, oprócz warunków skrawania: stop AZ31, $f_z=0,1\text{mm/strze}$, $v_c=300\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$.

Na rys. 4.25 przedstawiono wpływ głębokości skrawania na masę wióra po frezowaniu w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD.

a)



b)

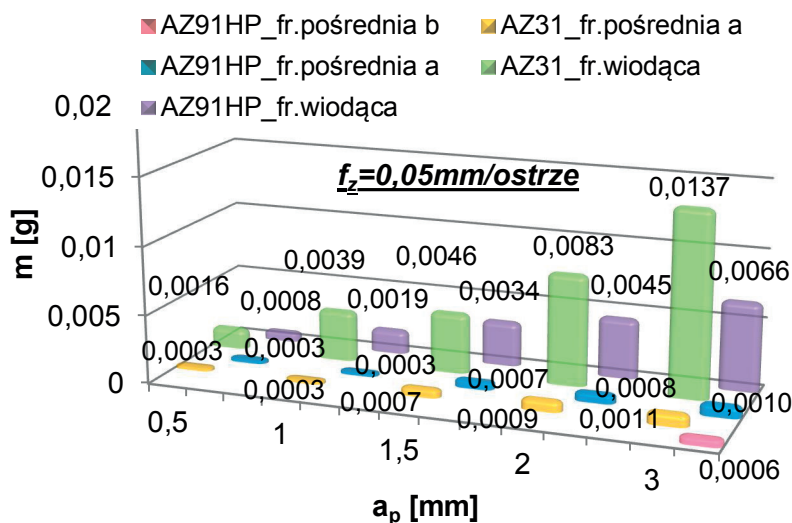


Rys. 4. 25. Wpływ głębokości skrawania a_p na średnią masę jednostkową wióra: a) $f_z=0,05\text{mm/tooth}$, b) $f_z=0,15\text{mm/tooth}$; $v_c=300\text{m/min}$

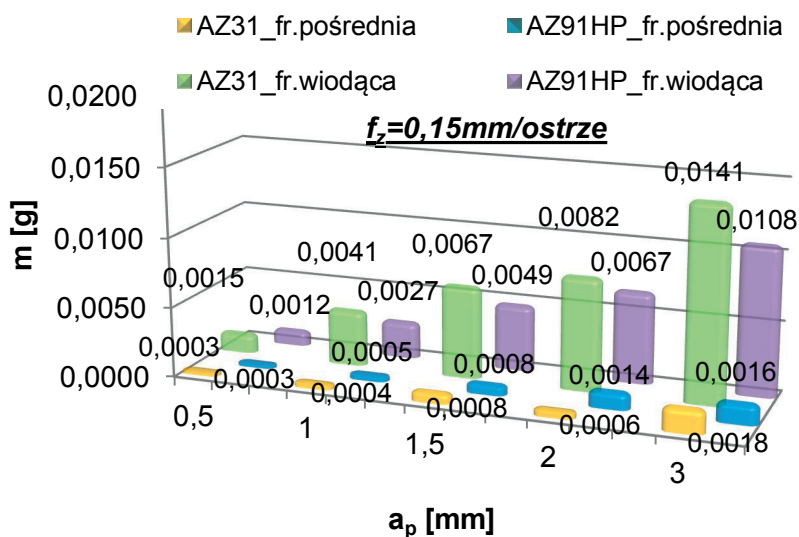
Podczas zmiany głębokości skrawania a_p (rys. 4.25) obserwowano wzrost średniej masy wióra frakcji wiodącej wraz ze wzrostem a_p . Interesującym jest fakt większej masy wiórów stopu AZ31 niż stopu AZ91HP.

Na rys. 4.26 przedstawiono wpływ głębokości skrawania na powstawanie pośrednich frakcji wiórów.

a)



b)



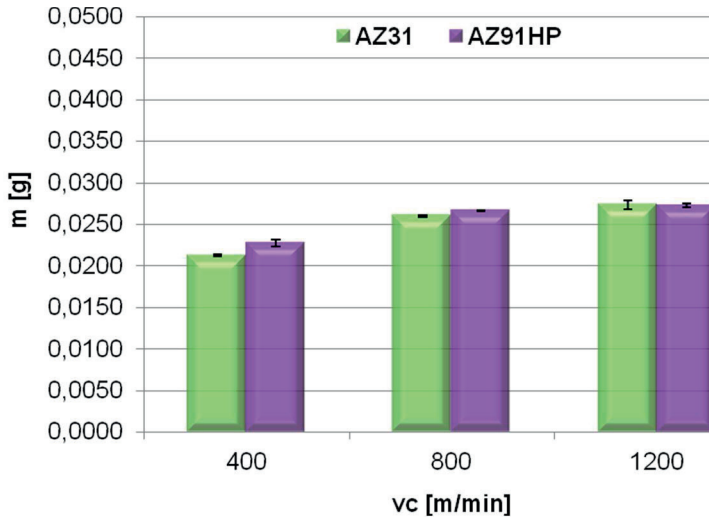
Rys. 4. 26. Wpływ głębokości skrawania a_p na powstawanie pośrednich frakcji wiórów:
a) $f_z=0,05\text{mm/strze}$, b) $f_z=0,15\text{mm/strze}$

Podczas zmiany głębokości skrawania (rys. 4.26) występuje fragmentowanie wiórów. Zjawisko to występuje w całym przedstawionym zakresie zmiany głębokości skrawania $a_p=(0,5\div 3)\text{mm}$ dla obydwu wartości posuwu na ostrze

$f_z=0,05\text{mm/ostre}$ oraz $f_z=0,15\text{mm/ostre}$. Wynika stąd, że dobór głębokości skrawania jest szczególnie ważny w projektowaniu procesów obróbki stopów Mg.

Przedstawione na rys. (4.27÷4.32) wykresy dotyczą frezowania w zakresie parametrów technologicznych: $v_c=(400\div1200)\text{m/min}$, $f_z=(0,05\div0,3)\text{mm/ostre}$, $a_p=(0,5\div3)\text{mm}$.

Na rys. 4.27 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na masę wióra po frezowaniu w przypadku zastosowania narzędzia węglowego z powłoką TiAlN.

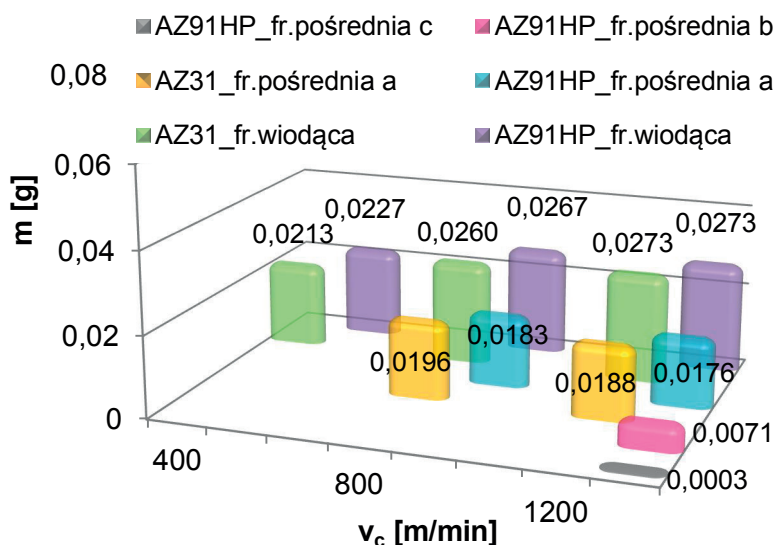


Rys. 4. 27. Wpływ prędkości skrawania v_c na średnią masę jednostkową wióra:
 $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$

Podczas zmiany prędkości skrawania v_c (rys. 4.27) obserwowano wzrost średniej masy wióra frakcji wiodącej w zakresie $v_c=(400\div800)\text{m/min}$, a następnie stabilizację.

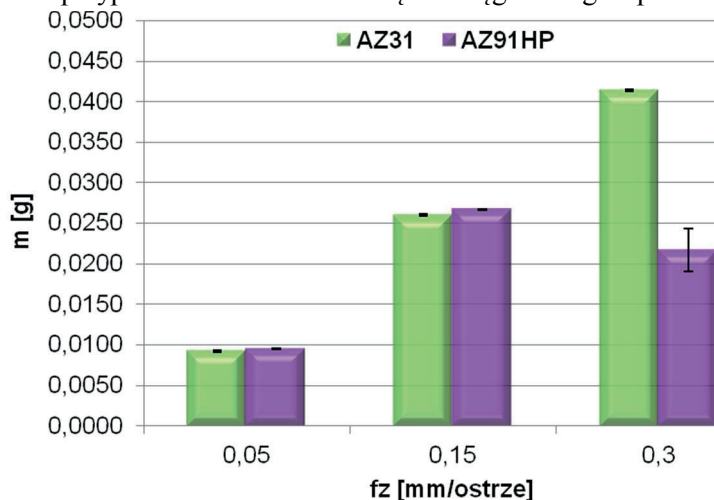
Na rys. 4.28 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na powstawanie pośrednich frakcji wiórów.

Zmiana prędkości skrawania (rys. 4.28) wpływa na fragmentowanie wiórów. Zjawisko to występuje w zakresie $v_c=(800\div1200)\text{m/min}$. Największa liczba frakcji pośrednich wiórów występuje w przypadku $v_c=1200\text{m/min}$ oraz stopu AZ91HP.



Rys. 4. 28. Wpływ prędkości skrawania v_c na powstawanie pośrednich frakcji wiórów

Na rys. 4.29 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze, na masę wióra po frezowaniu w przypadku zastosowania narzędzia węglowego z powłoką TiAlN.

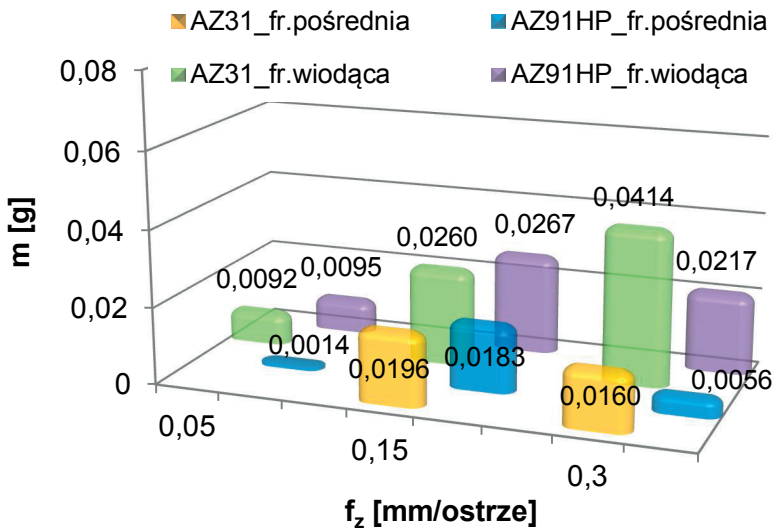


Rys. 4. 29. Wpływ posuwu na ostrze f_z na średnią masę jednostkową wióra:
 $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$

Jak wynika z rys. 4.29 wzrost posuwu powoduje wzrost średniej masy wióra frakcji wiodącej w przypadku stopu AZ31. W przypadku stopu AZ91HP występuje zmienna tendencja wzrostu, a następnie spadku średniej masy wióra

frakcji wiodącej. Jest to związane prawdopodobnie ze wzrostem stopnia deformacji wióra w strefie skrawania, co z kolei wpływa na charakter procesu tworzenia i łamania wióra. Związane jest to również z właściwościami odlewniczych stopów metali.

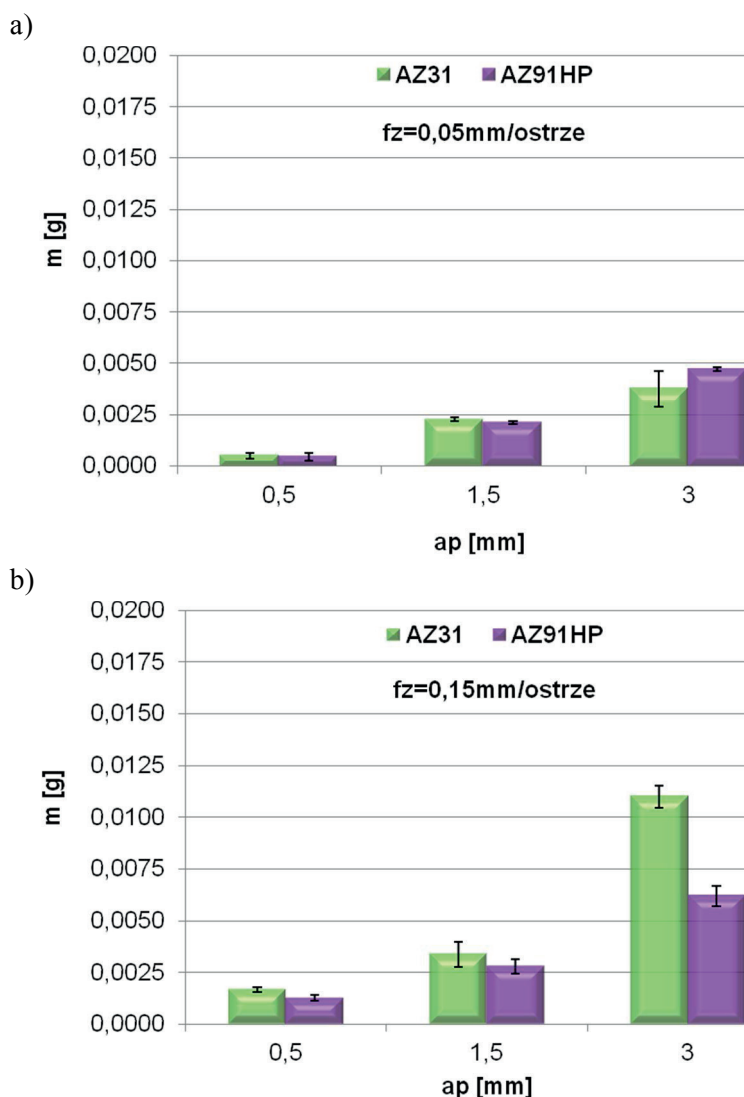
Na rys. 4.30 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze na powstawanie pośrednich frakcji wiórów.



Rys. 4. 30. Wpływ posuwu na ostrze f_z na powstawanie pośrednich frakcji wiórów

Zmiana posuwu na ostrze (rys. 4.30), także w tym przypadku, wpływa na fragmentowanie wiórów. Zjawisko to ma miejsce w całym zakresie zmiany posuwu, oprócz warunków skrawania: stop AZ31, $f_z=0,05\text{mm/strze}$, $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$.

Na rys. 4.31 przedstawiono wpływ głębokości skrawania na masę wióra po frezowaniu w przypadku zastosowania narzędzia węglkowego z powłoką TiAlN.



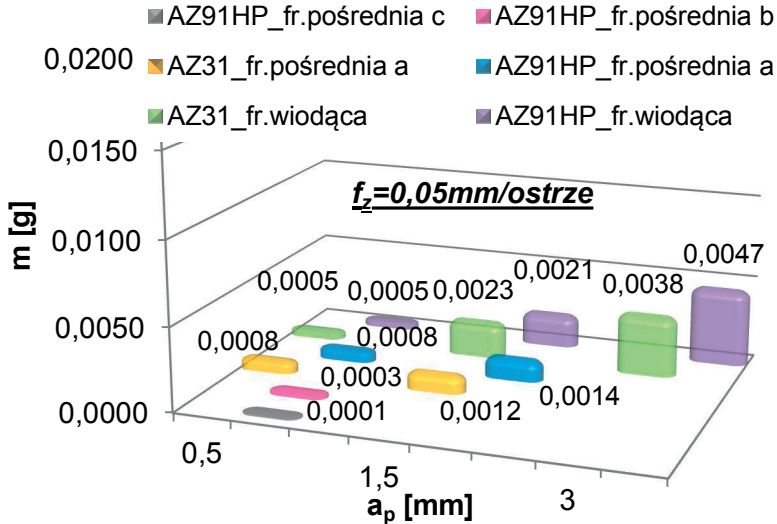
Rys. 4. 31. Wpływ głębokości skrawania a_p na średnią masę jednostkową wióra:
a) $f_z=0,05\text{mm/strze}$, b) $f_z=0,15\text{mm/strze}$; $v_c=800\text{m/min}$

Zmiana głębokości skrawania a_p (rys. 4.31) wpływa na wzrost średniej masy wióra frakcji wiodącej. Zarówno w przypadku posuwu $f_z=0,05\text{mm/strze}$ jak i $f_z=0,15\text{mm/strze}$ jest to przyrost proporcjonalny. Dla warunków skrawania: $a_p=3\text{mm}$, $f_z=0,15\text{mm/strze}$, $v_c=800\text{m/min}$ występuje podobna tendencja jak na rys. 4.29, z tym że w tym przypadku dla $a_p=3\text{mm}$ i stopu AZ91HP nie występuje tendencja spadku masy, tylko mniejszy przyrost masy wióra niż dla stopu AZ31.

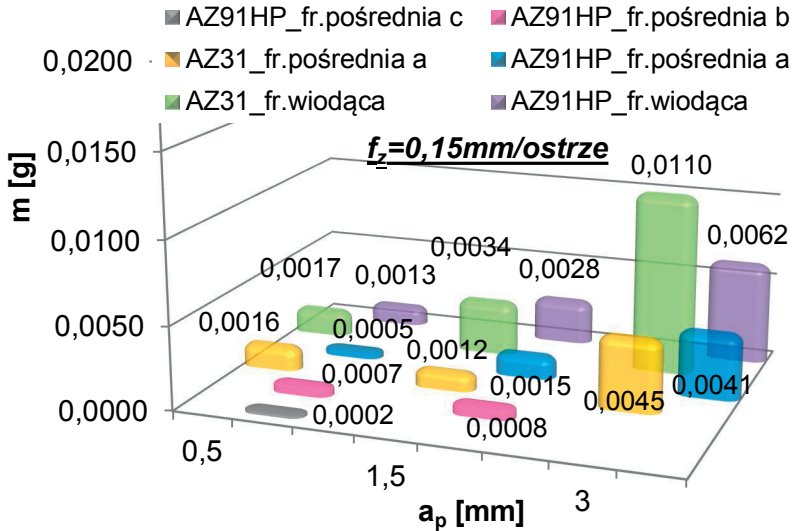
Jest to związane głównie z mechanizmem deformacji wióra oraz właściwościami materiału obrabianego.

Na rys. 4.32 przedstawiono wpływ głębokości skrawania na powstawanie pośrednich frakcji wiórów.

a)



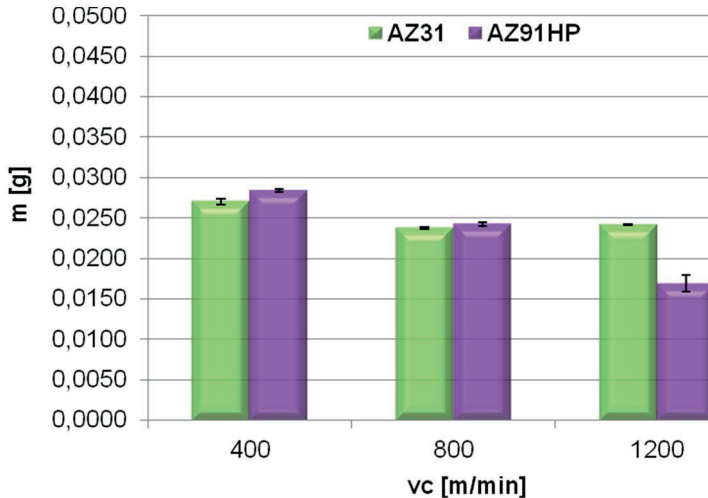
b)



Rys. 4. 32. Wpływ głębokości skrawania a_p na powstawanie pośrednich frakcji wiórów:
a) $f_z = 0,05 \text{ mm/strze}$, b) $f_z = 0,15 \text{ mm/strze}$

Zmiana głębokości skrawania (rys. 4.32) wpływa na fragmentowanie wiórów. Zjawisko to ma miejsce w całym zakresie zmiany głębokości skrawania, oprócz warunków skrawania: stop AZ31 i AZ91HP: $a_p=3\text{mm}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, $v_c=800\text{m/min}$.

Na rys. 4.33 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na masę wióra po frezowaniu w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD.

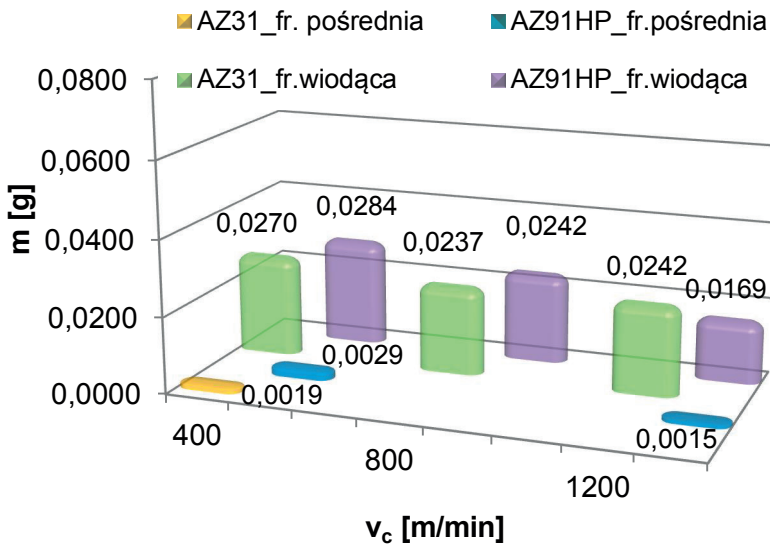


Rys. 4.33. Wpływ prędkości skrawania v_c na średnią masę jednostkową wióra:
 $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$

Dla zastosowanego narzędzia z ostrzem PKD odnotowano nieznaczny spadek średniej masy wióra frakcji wiodącej podczas zmiany prędkości skrawania v_c (rys. 4.33). Zależność taka jest obserwowana jedynie dla narzędzia z ostrzem PKD w zakresie tzw. „obróbki szybkościowej”, podczas zmiany prędkości skrawania. Dotyczy to stopu AZ91HP, dla AZ31 praktycznie nie obserwuje się istotnych zmian.

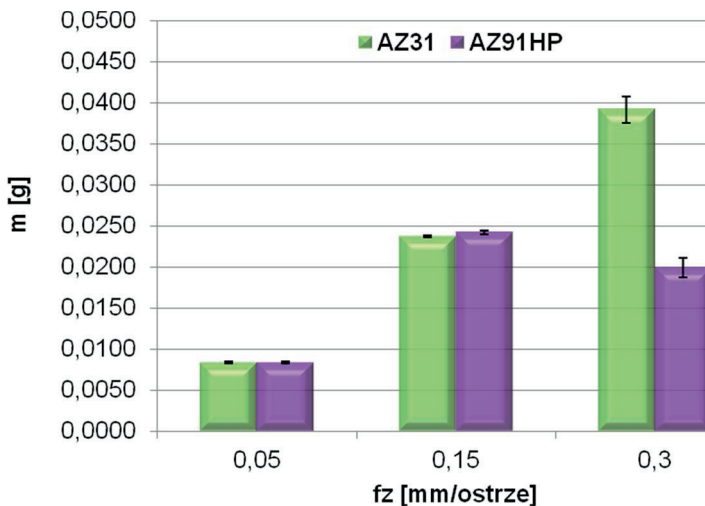
Na rys. 4.34 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na powstawanie pośrednich frakcji wiórów.

Zmiana prędkości skrawania (rys. 4.34) wpływa na fragmentowanie wiórów. Zjawisko to ma miejsce w warunkach skrawania: stop AZ31 $v_c=400\text{m/min}$, AZ91HP $v_c=400\text{m/min}$ oraz $v_c=1200\text{m/min}$. W przypadku $v_c=800\text{m/min}$, dla obydwu stopów magnezu fragmentacja nie występuje.



Rys. 4. 34. Wpływ prędkości skrawania v_c na powstawanie pośrednich frakcji wiórów

Na rys. 4.35 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze, na masę wióra po frezowaniu w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD.

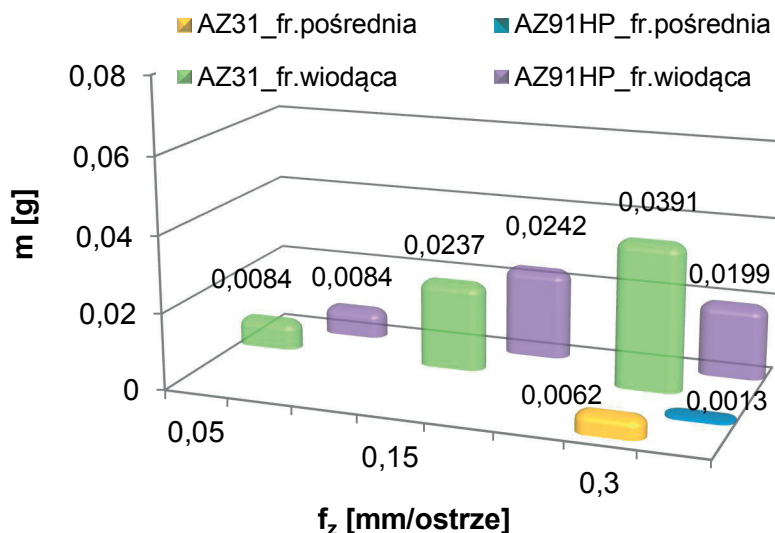


Rys. 4. 35. Wpływ posuwu na ostrze f_z na średnią masę jednostkową wióra:
 $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$

Zmiana posuwu na ostrze f_z w przypadku narzędzia z ostrzem PKD (rys. 4.35), powoduje zmianę masy jednostkowej wiórów, podobnie jak dla narzędzia węglowego z powłoką TiAlN (rys. 4.29). Wzrost posuwu powoduje

wzrost średniej masy wióra frakcji wiodącej w przypadku stopu AZ31, natomiast w przypadku stopu AZ91HP występuje rozrzut masy wióra (wzrost a następnie spadek masy wióra).

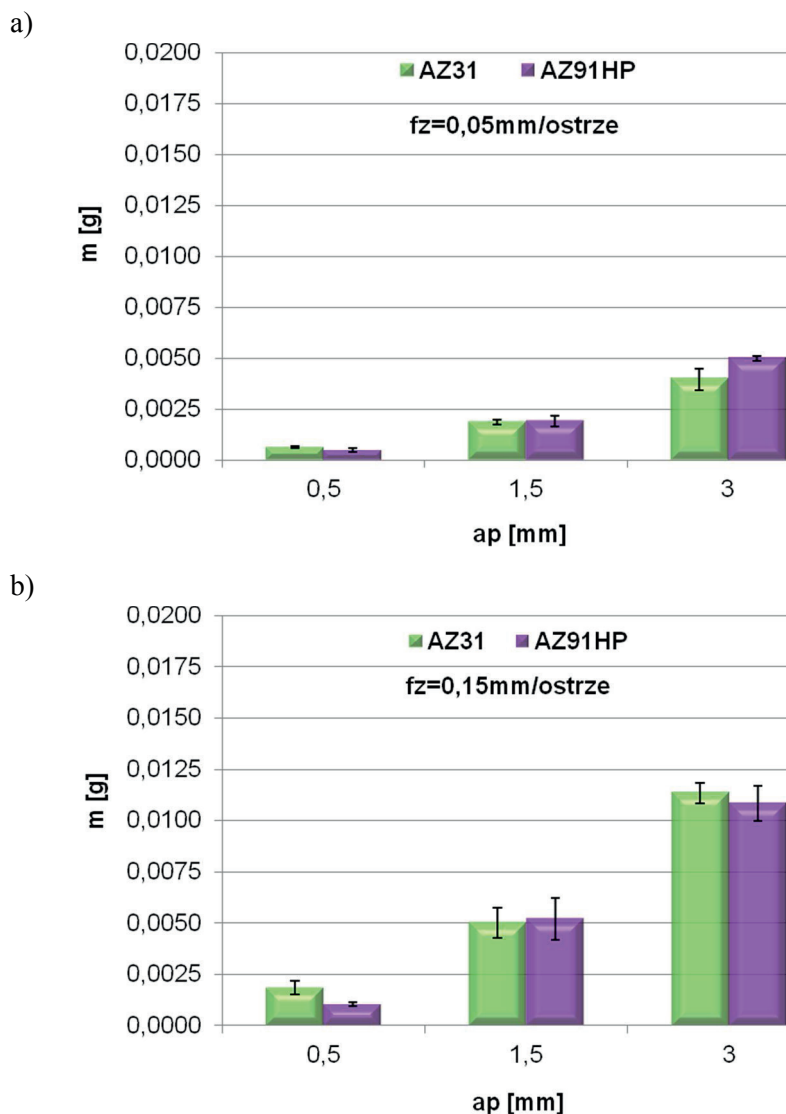
Na rys. 4.36 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze, na powstawanie pośrednich frakcji wiórów.



Rys. 4. 36. Wpływ posuwu na ostrze f_z na powstawanie pośrednich frakcji wiórów

Zmiana posuwu na ostrze (rys. 4.30) wpływa na fragmentowanie wiórów. Zjawisko to ma miejsce w warunkach skrawania: stop AZ31 i AZ91HP $f_z=0,3\text{mm/strze}$.

Na rys. 4.37 przedstawiono wpływ głębokości skrawania na masę wióra po frezowaniu w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD.

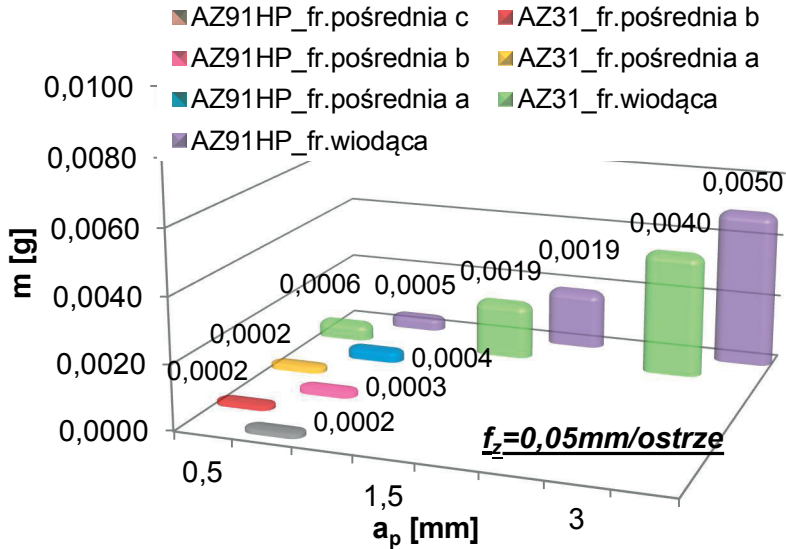


Rys. 4. 37. Wpływ głębokości skrawania a_p na średnią masę jednostkową wióra: a) $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, b) $f_z=0,15\text{mm/ostre}$; $v_c=800\text{m/min}$

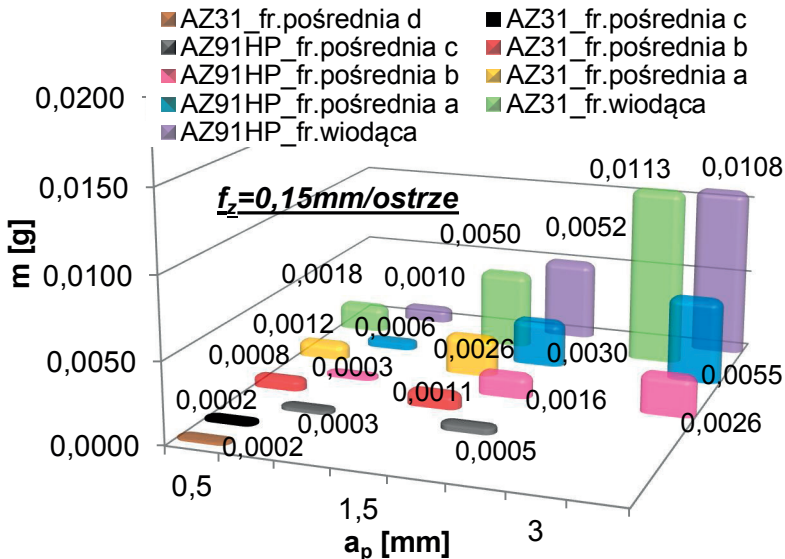
Wzrost głębokości skrawania a_p (rys. 4. 31) wpływa na wzrost średniej masy wióra frakcji wodącej zarówno w przypadku posuwu $f_z=0,05\text{mm/ostre}$ jak i dla $f_z=0,15\text{mm/ostre}$.

Na rys. 4.38 przedstawiono wpływ głębokości skrawania na powstawanie pośrednich frakcji wiórów.

a)



b)



Rys. 4. 38. Wpływ głębokości skrawania a_p na powstawanie pośrednich frakcji wiórów:
a) $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, b) $f_z=0,15\text{mm/ostre}$

Zmiana głębokości skrawania (rys. 4.38) wpływa na fragmentowanie wiórów. Zjawisko to ma miejsce w warunkach skrawania: w przypadku posuwu na ostrze $f_z=0,05\text{mm/ostre}$ dla stopu AZ31 i AZ91HP $a_p=0,5\text{mm}$; w przypadku

posuwu na ostrze $f_z=0,15\text{mm}/\text{ostrze}$ dla stopu AZ31 $a_p=0,5\text{mm}$ oraz $a_p=1,5\text{mm}$, dla stopu AZ91HP $a_p=0,5\text{mm}$, $a_p=1,5\text{mm}$, $a_p=3\text{mm}$.

W analizowanym eksperymencie wykorzystywano również narzędzie węglkowe o specyficznej geometrii, tj. geometrii typu Kordell. Narzędzie to powoduje nadmierne rozdrobnienie wiórów, uniemożliwiając w ten sposób wyselekcjonowanie określonych frakcji wiórów. Z tego względu w dalszej części pracy narzędzie to zostało odrzucone jako nie zalecane do obróbki stopów Mg.

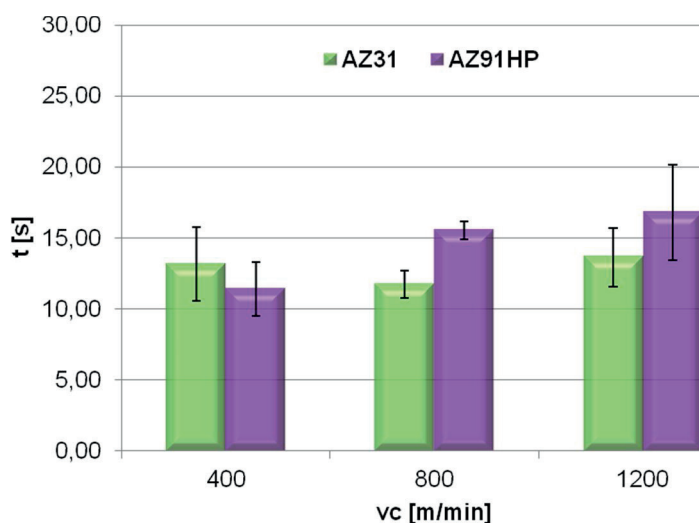
Generalnie dla zmniejszenia zjawiska fragmentowania korzystniej jest zwiększać głębokość skrawania niż posuw, należy jednak pamiętać że nadmierny wzrost głębokości skrawania wpływa na wzrost sił skrawania oraz wzrost temperatury s trefie skrawania. Uogólniając, korzystniej jest obrabiać z małymi posuwami oraz większymi głębokościami skrawania, niż z małymi głębokościami skrawania a dużymi posuwami.

5.1.5. Wyniki badań czasu do zapłonu wiórów ze stopów Mg

Kolejnym analizowanym parametrem, wpływającym na bezpieczeństwo podczas obróbki stopów magnezu jest czas do zapłonu, analizowany w określonych warunkach. Przedstawione wykresy (rys. 4.39÷4.50), obrazują czas potrzebny do zapłonu wióra w zakresie parametrów technologicznych: $v_c=(400\div1200)\text{m}/\text{min}$, $f_z=(0,05\div0,3)\text{mm}/\text{ostrze}$, $a_p=(0,5\div3)\text{mm}$. Badania prowadzono na specjalnym stanowisku według metodyki przedstawionej w trzeciej części rozprawy **3.1.5. Metodyka badań czasu do zapłonu wiórów ze stopów Mg**.

Dla większej przejrzystości i przydatności technologicznej uzyskanych rezultatów zdecydowano się w rozprawie wyniki przedstawiać w funkcji technologicznych parametrów obróbki, a nie masy wiórów w aspekcie zdefiniowanych frakcji.

Na rys. 4.39 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na średni czas do zapłonu wiórów po frezowaniu w przypadku zastosowania narzędzia węglkowego z powłoką TiAlN. Średni czas do zapłonu wiórów dotyczy tzw. frakcji wiodącej wiórów.

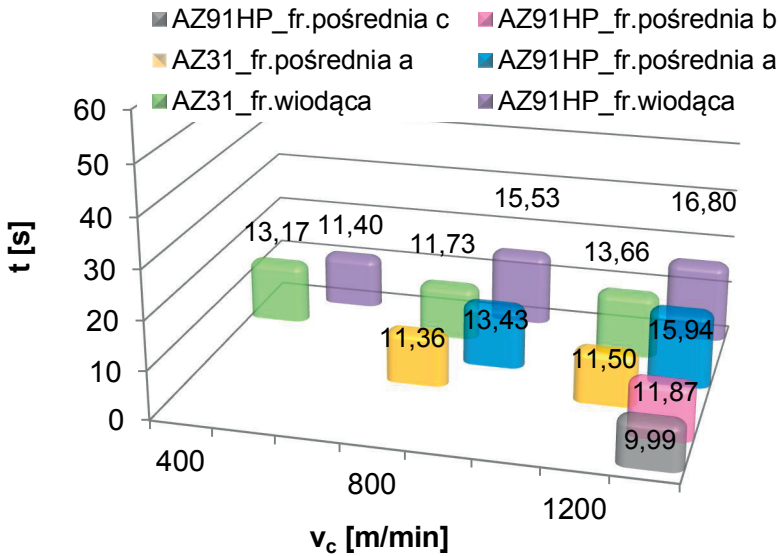


Rys. 4. 39. Wpływ prędkości skrawania v_c na czas do zapłonu frakcji wiodącej wiórów:
 $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$; $T_{\text{max}}=525,4\pm 1,7^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=521,8\pm 1,6^\circ\text{C}$

Jak można zaobserwować z rys. 4.39 zmiana prędkości skrawania nie wpływa w sposób jednoznaczny oraz istotny na wzrost czasu do zapłonu (podobnie jak w przypadku analizy masy wióra – rys. 4.27). Dla wiórów ze stopu AZ91HP następuje niewielki wzrost średniego czasu do zapłonu, dla wiórów ze stopu AZ31 nie obserwuje się jednoznacznej tendencji.

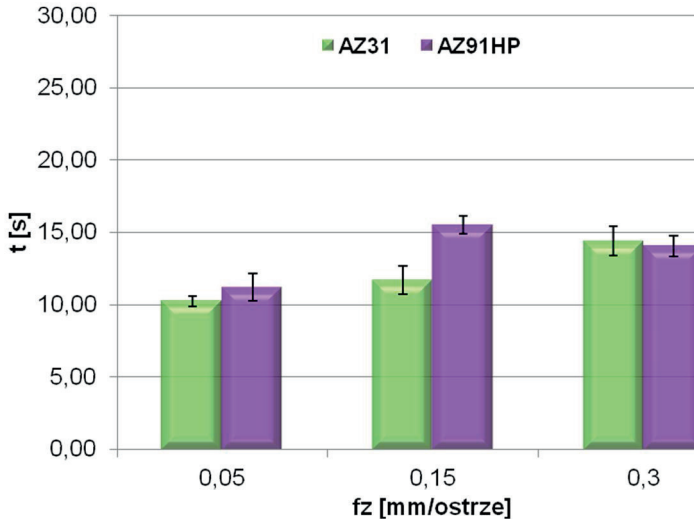
W zakresie zmiany prędkości skrawania oprócz frakcji wiodącej występuje frakcja pośrednia wiórów. Na rys. 4.40 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na czas do zapłonu pośrednich frakcji wiórów. Czas podany jest na wykresach w sposób szczegółowy.

Istotne jest (jak przedstawiono na rys. 4.40), że nawet dla frakcji pośrednich wiórów (szczególnie dla „frakcji pośredniej c”) nie występuje drastyczne skrócenie czasu do zapłonu w porównaniu do frakcji wiodącej wiórów, mimo że masa wymienionych frakcji różni się w sposób znaczący (patrz rys. 4.27 oraz 4.28). Jest to istotne stwierdzenie z punktu widzenia bezpieczeństwa podczas obróbki, gdyż nawet frakcja pośrednia nie ulega zapłonowi w sposób natychmiastowy (potrzebny jest czas niezbędny do zapłonu wióra, nawet w przypadku wióra o małej masie, rzędu $m=0,0003\text{g}$).



Rys. 4. 40. Wpływ prędkości skrawania v_c na czas do zapłonu, z uwzględnieniem frakcji pośrednich wiórów: $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$; $T_{\text{max}}=525,4\pm 1,7^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=521,8\pm 1,6^\circ\text{C}$

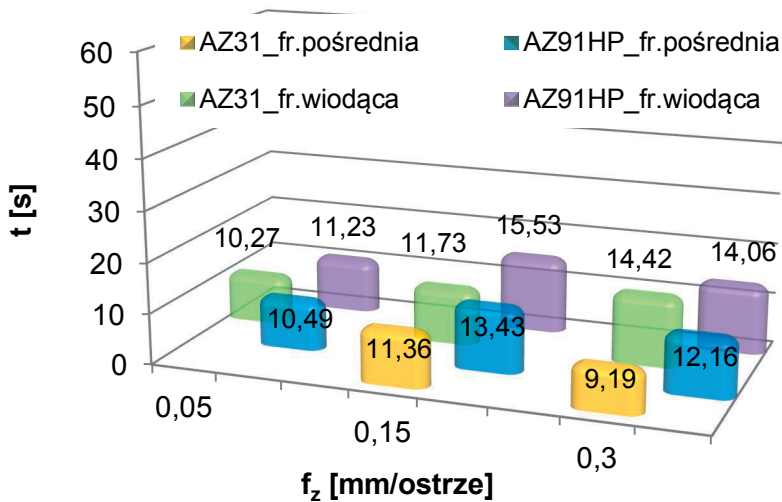
Na rys. 4.41 przedstawiono wpływ zmiany posuwu na ostrze, na czas do zapłonu po frezowaniu w przypadku zastosowania narzędzia węglkowego z powłoką TiAlN. Średni czas do zapłonu wiórów dotyczy tzw. frakcji wiodącej wiórów.



Rys. 4. 41. Wpływ posuwu na ostrze f_z na czas do zapłonu frakcji wiodącej wiórów: $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$; $T_{\text{max}}=529,3\pm 1,7^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=525,8\pm 1,7^\circ\text{C}$

Podczas zmiany posuwu na ostrze (rys. 4.41) dla $f_z=(0,05\div0,15)\text{mm/ostre}$ występuje wzrost (zwiększenie) czasu potrzebnego do wywołania zapłonu wióra, następnie w zakresie $f_z=(0,15\div0,3)\text{mm/ostre}$ występuje spadek wartości czasu – dla wiórów ze stopu AZ91HP oraz dalszy wzrost – dla wiórów ze stopu AZ31.

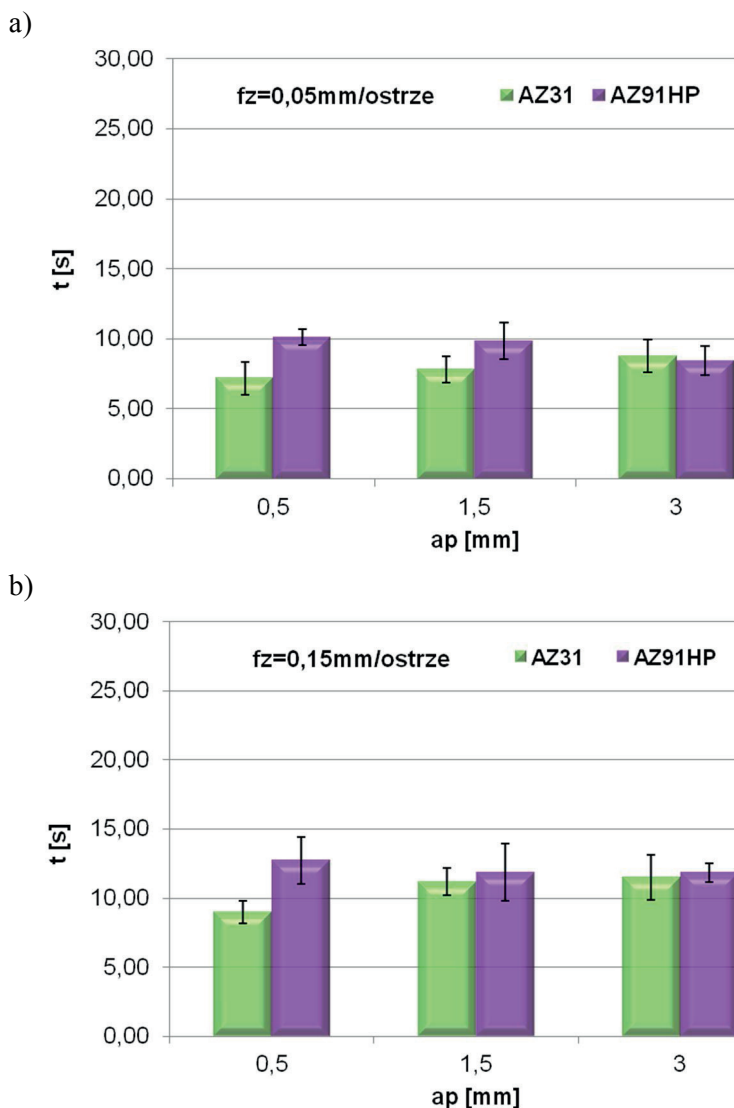
W zakresie zmiany posuwu na ostrze oprócz frakcji wiodącej występuje frakcja pośrednia wiórów. Na rys. 4.42 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze, na czas do zapłonu pośrednich frakcji wiórów, podany na wykresach w sposób liczbowy.



Rys. 4. 42. Wpływ posuwu na ostrze f_z na czas do zapłonu, z uwzględnieniem frakcji pośrednich wiórów: $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$; $T_{\text{max}}=529,3\pm1,7^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=525,8\pm1,7^\circ\text{C}$

Również w przypadku zmiany posuwu na ostrze (rys. 4.42), pomimo mniejszej średniej masy wiórów (patrz rys. 4.30) średni czas do zapłonu wióra nie jest wprost proporcjonalny do masy wióra. Jest to istotne stwierdzenie, wartość posuwu jest parametrem istotnie wpływającym na kształt i wielkość wióra, z punktu widzenia podatności na zapłon parametr ten nie ma zasadniczego znaczenia, jak można było oczekiwać. Czas ten jest wielokrotnie dłuższy niż czas formowania wióra warunkach obróbki. Czas ten dla warunków skrawania $v_c=(150\div1200)\text{m/min}$ wyniósł odpowiednio $(0,01\div0,001)\text{s}$. Przykładowo średni czas do zapłonu wióra frakcji pośredniej dla stopu AZ91HP jest zbliżony do wartości odpowiadającej frakcji wiodącej wiórów.

Na rys. 4.43 przedstawiono wpływ głębokości skrawania na masę wióra po frezowaniu w przypadku zastosowania narzędzia węglkowego z powłoką TiAlN. Średni czas do zapłonu wiórów dotyczy tzw. frakcji wiodącej wiórów.



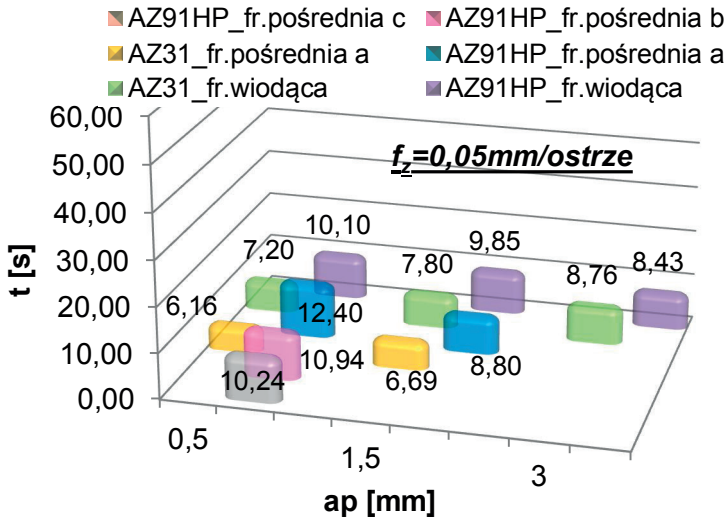
Rys. 4. 43. Wpływ głębokości skrawania a_p na czas do zapłonu frakcji wiodącej wiórów:
 a) $f_z=0,05\text{mm/strze}$; $T_{\text{max}}=520,8\pm1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=515,0\pm1,6^\circ\text{C}$; b) $f_z=0,15\text{mm/strze}$;
 $T_{\text{max}}=525,2\pm1,7^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=521,2\pm1,6^\circ\text{C}$

W zakresie zmiany głębokości skrawania (rys. 4.43) obserwowano zbliżony średni czas do zapłonu dla poszczególnych głębokości skrawania. Zmiana średniej masy wióra frakcji wiodącej nie wpływa w bezpośredni sposób na średni czas do zapłonu.

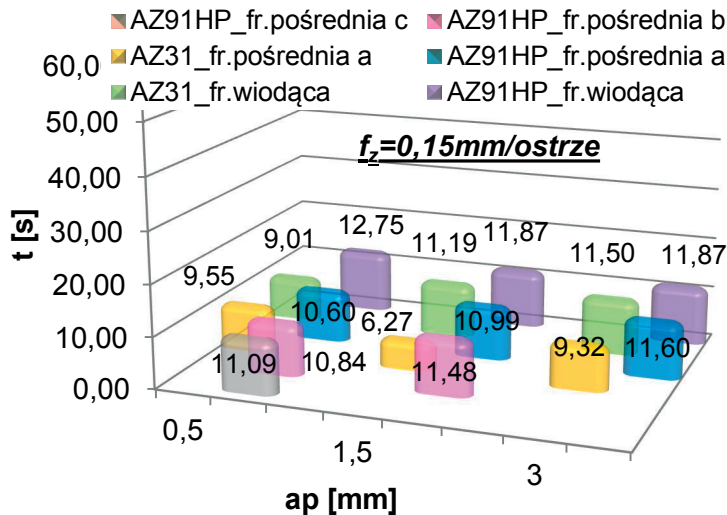
W zakresie zmiany głębokości skrawania oprócz frakcji wiodącej występuje frakcja pośrednia wiórów. Na rys. 4.44 przedstawiono wpływ zmiany głębokości

skrawania na czas do zapłonu pośrednich frakcji wiórów, podany na wykresach w sposób liczbowy.

a)



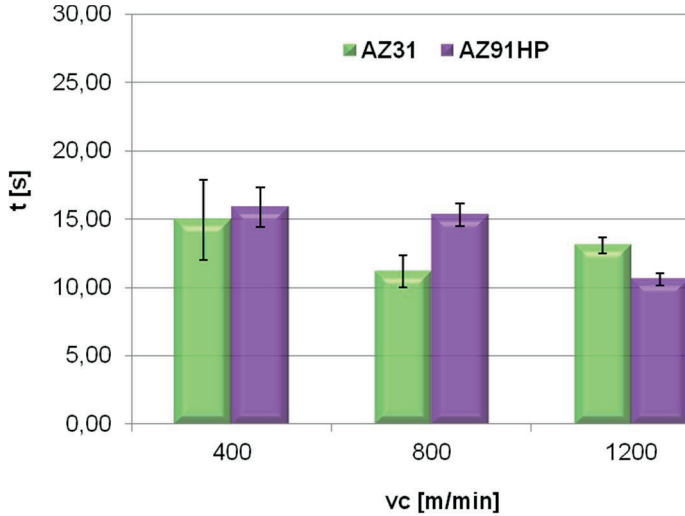
b)



Rys. 4. 44. Wpływ głębokości skrawania a_p na czas do zapłonu, z uwzględnieniem frakcji pośrednich wiórów: a) $f_z = 0,05 \text{ mm/ostre}$; $T_{\text{max}} = 520,8 \pm 1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{śr}} = 515,0 \pm 1,6^\circ\text{C}$; b) $f_z = 0,15 \text{ mm/ostre}$; $T_{\text{max}} = 525,2 \pm 1,7^\circ\text{C}$, $T_{\text{śr}} = 521,2 \pm 1,6^\circ\text{C}$

W przypadku zmiany głębokości skrawania (rys. 4.44) dla frakcji pośrednich wiórów obserwowano (w większości przypadków) czas do zapłonu porównywalny z czasem zarejestrowanym dla frakcji wiodącej wiórów. Dłuższy czas do zapłonu obserwowano dla wiórów ze stopu AZ91HP.

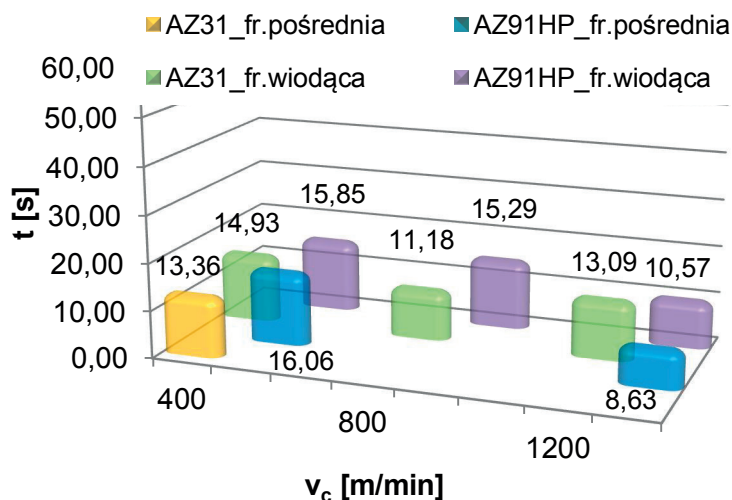
Na rys. 4.45 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na czas do zapłonu po frezowaniu w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD. Średni czas do zapłonu wiórów dotyczy tzw. frakcji wiodącej wiórów.



Rys. 4. 45. Wpływ prędkości skrawania v_c na czas do zapłonu frakcji wiodącej wiórów:
 $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$; $T_{\text{max}}=523,2\pm1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=518,1\pm1,6^\circ\text{C}$

W przypadku narzędzia z ostrzem PKD (rys. 4.45), dla wiórów ze stopu AZ31 występuje spadek średniego czasu do zapłonu w zakresie $v_c=(400\div800)\text{m/min}$, a następnie wzrost dla $v_c=(800\div1200)\text{m/min}$. Natomiast dla wiórów ze stopu AZ91HP występuje tendencja spadkowa średniego czasu do zapłonu wraz ze wzrostem v_c .

W zakresie zmiany prędkości skrawania oprócz frakcji wiodącej występuje frakcja pośrednia wiórów. Na rys. 4.46 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na czas do zapłonu pośrednich frakcji wiórów, podany na wykresach w sposób liczbowy.

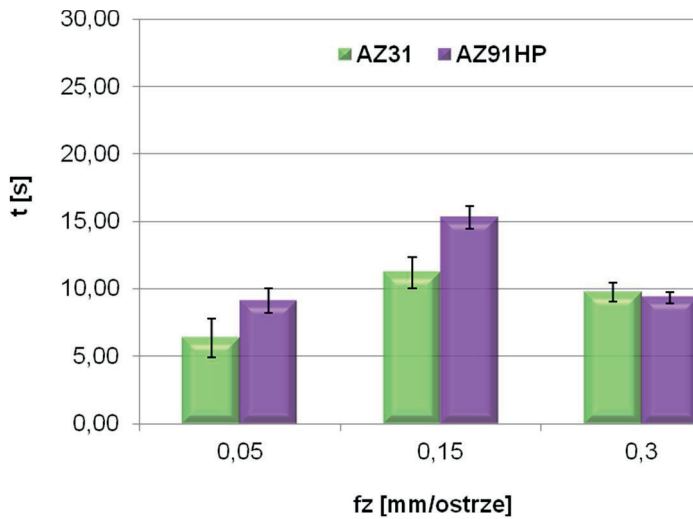


Rys. 4. 46. Wpływ prędkości skrawania v_c na czas do zapłonu, z uwzględnieniem frakcji pośrednich wiórów: $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$; $T_{\text{max}}=523,2\pm1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=518,1\pm1,6^\circ\text{C}$

Podobnie jak dla narzędzia węglkowego z powłoką TiAlN, również w przypadku narzędzia z ostrzem PKD (rys. 4.46), średni czas do zapłonu frakcji pośrednich wiórów jest zbliżony do czasu obserwowanego dla frakcji wiodącej. Jest to ważne stwierdzenie, gdyż pomimo mniejszej masy frakcji pośrednich czas do zapłonu jest porównywalny z czasem do zapłonu frakcji wiodącej wiórów. Czas do zapłonu dla wiórów ze stopu AZ91HP (przy $v_c=400\text{m/min}$) jest dłuższy niż dla wiórów ze stopu AZ31. Jest to tendencja zgodna z oczekiwaną.

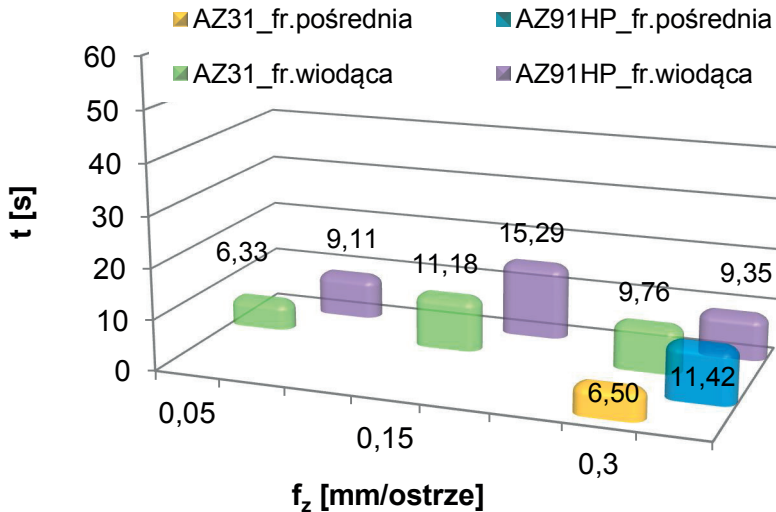
Na rys. 4.47 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze, na czas do zapłonu wióra po frezowaniu w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD. Średni czas do zapłonu wiórów dotyczy tzw. frakcji wiodącej wiórów.

Obserwacje średniego czasu do zapłonu frakcji wiodącej wiórów w przypadku zmiany f_z (rys. 4.47) pozwalają zauważyć dwie tendencje: wzrostu średniego czasu do zapłonu w zakresie $f_z=(0,05\div0,15)\text{mm/ostre}$, a następnie spadku średniego czasu do zapłonu dla $f_z=(0,15\div0,3)\text{mm/ostre}$. Dla posuwu $f_z=0,05\text{mm/ostre}$ oraz $f_z=0,15\text{mm/ostre}$ czas do zapłonu był dłuższy dla wiórów ze stopu AZ91HP, natomiast przy $f_z=0,3\text{mm/ostre}$ czas ten był porównywalny dla wiórów z obydwu gatunków stopów Mg.



Rys. 4. 47. Wpływ posuwu na ostrze f_z na czas do zapłonu frakcji wiodącej wiórów: $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$; $T_{\text{max}}=522,7\pm 1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=519,0\pm 1,6^\circ\text{C}$

Zmiana prędkości skrawania powoduje, występowanie oprócz frakcji wiodącej, frakcji pośredniej wiórów. Na rys. 4.48 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze, na czas do zapłonu pośrednich frakcji wiórów, podany na wykresach w sposób liczbowy.



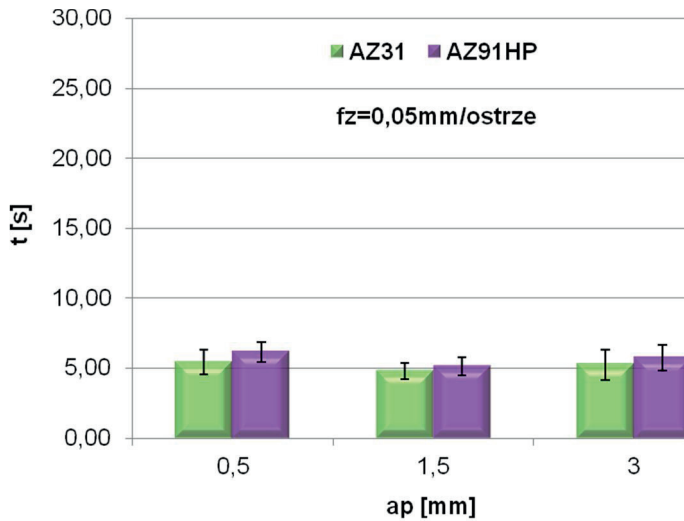
Rys. 4. 48. Wpływ posuwu na ostrze f_z na czas do zapłonu, z uwzględnieniem frakcji pośrednich wiórów: $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$; $T_{\text{max}}=522,7\pm 1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=519,0\pm 1,6^\circ\text{C}$

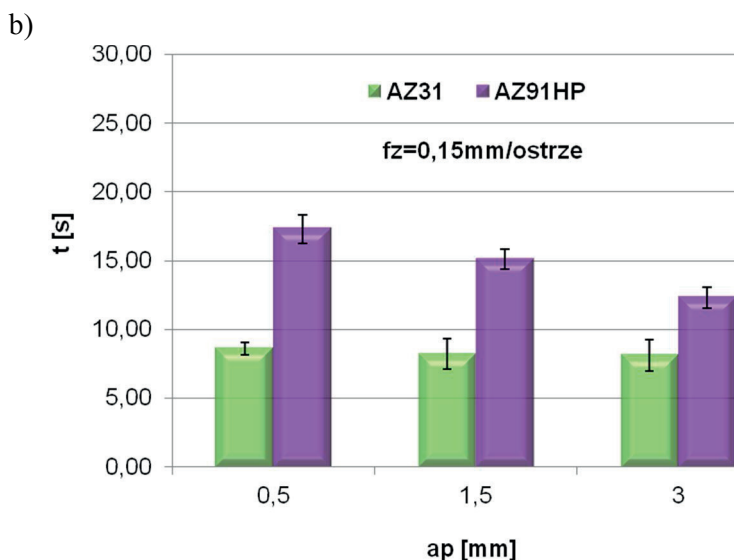
Analizując średni czas do zapłonu frakcji pośrednich wiórów (rys. 4.48) zauważyć można, że czas ten dla wiórów ze stopu AZ91HP był dłuższy niż dla wiórów ze stopu AZ31 (przy $f_z=0,3\text{mm/ostre}$). W pozostałych warunkach (tj. dla zakresu $f_z=(0,05\div0,15)\text{mm/ostre}$) nie występują frakcje pośrednie wiórów, a więc niebezpieczeństwo niekontrolowanego zapłonu podczas obróbki jest znacznie mniejsze. Obrabiając narzędziem z ostrzem PKD należy stosować małe lub średnie wartości posuwu tak, aby nie powodować niekorzystnego rozdrabniania wiórów.

Na rys. 4.49 przedstawiono wpływ głębokości skrawania na czas do zapłonu wióra po frezowaniu w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD. Średni czas do zapłonu wiórów dotyczy tzw. frakcji wiodącej wiórów.

W zakresie zmiany głębokości skrawania (rys. 4.49a) obserwowano zbliżony średni czas do zapłonu, przy $f_z=0,05\text{mm/ostre}$ dla poszczególnych głębokości skrawania. Zmiana średniej masy wióra frakcji wiodącej nie wpływa w bezpośredni sposób na średni czas do zapłonu. W przypadku $f_z=0,15\text{mm/ostre}$ dla stopu AZ31 obserwowano podobną tendencję jak na rys. 4.49a. Natomiast analizując rys. 4.49b zauważyć można spadek średniego czasu do zapłonu dla wiórów ze stopu AZ91HP.

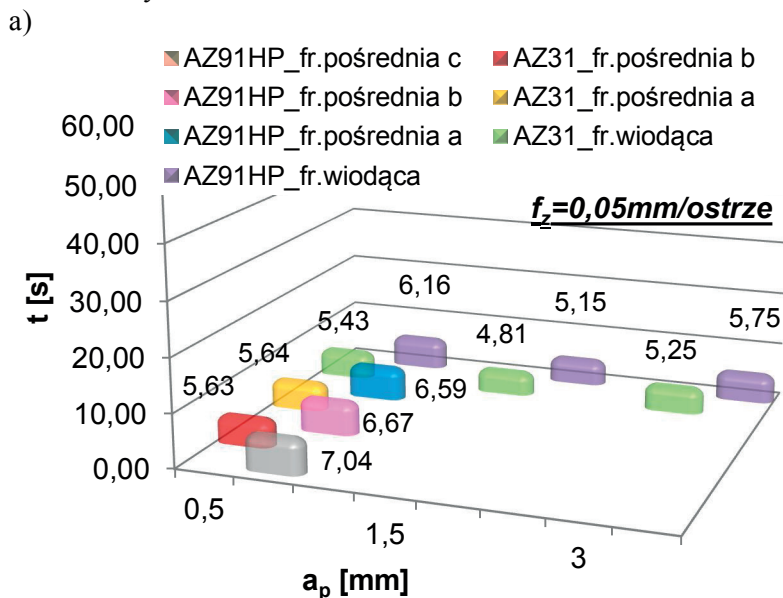
a)



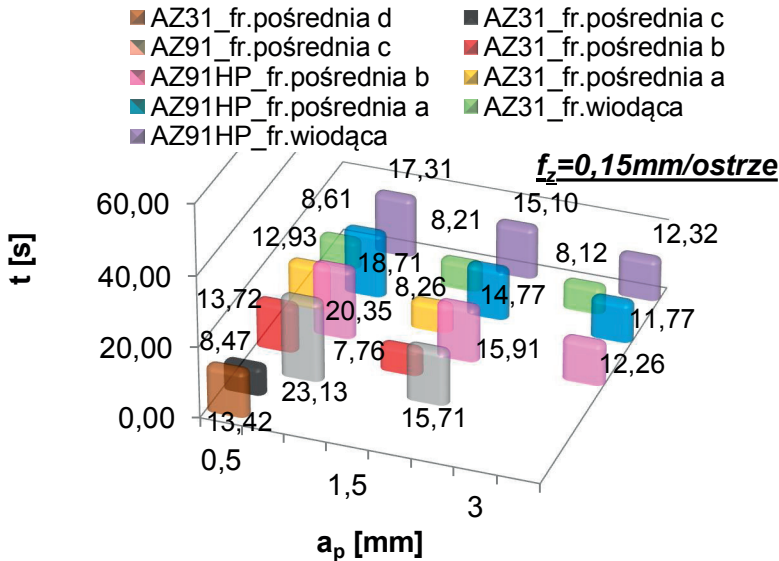


Rys. 4. 49. Wpływ głębokości skrawania a_p na czas do zapłonu frakcji wiodącej wiórów:
 a) $f_z=0,05\text{mm/ostre}$; $T_{\text{max}}=519,8\pm1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=514,8\pm1,6^\circ\text{C}$, b) $f_z=0,15\text{mm/ostre}$;
 $T_{\text{max}}=515,7\pm1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=512,0\pm1,6^\circ\text{C}$

Zmiana głębokości skrawania powoduje występowanie oprócz frakcji wiodącej, frakcji pośredniej wiórów. Na rys. 4.50 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze, na czas do zapłonu pośrednich frakcji wiórów, podany na wykresach w sposób liczbowy.



b)

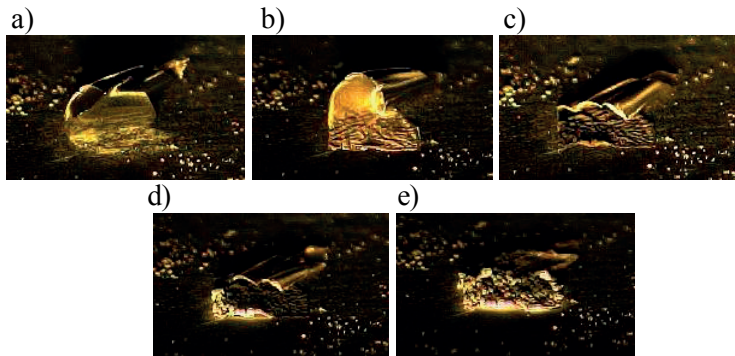


Rys. 4. 50. Wpływ głębokości skrawania a_p na czas do zapłonu, z uwzględnieniem frakcji pośrednich wiórów: a) $f_z=0,05 \text{ mm/strze}$; $T_{\text{max}}=519,8 \pm 1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=514,8 \pm 1,6^\circ\text{C}$, b) $f_z=0,15 \text{ mm/strze}$; $T_{\text{max}}=515,7 \pm 1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=512,0 \pm 1,6^\circ\text{C}$

W przypadku zmiany głębokości skrawania (rys. 4.50) dla frakcji pośrednich wiórów obserwowano (w większości przypadków) czas do zapłonu porównywalny z czasem zarejestrowanym dla frakcji wiodącej wiórów. Dłuższy czas do zapłonu obserwowano dla wiórów ze stopu AZ91HP, niż dla wiórów ze stopu AZ31. Jest to tendencja zgodna z oczekiwaną, prawdopodobnie ma to związek z większą ilością składników stopowych (a przez to mniejszą ilość czystego Mg).

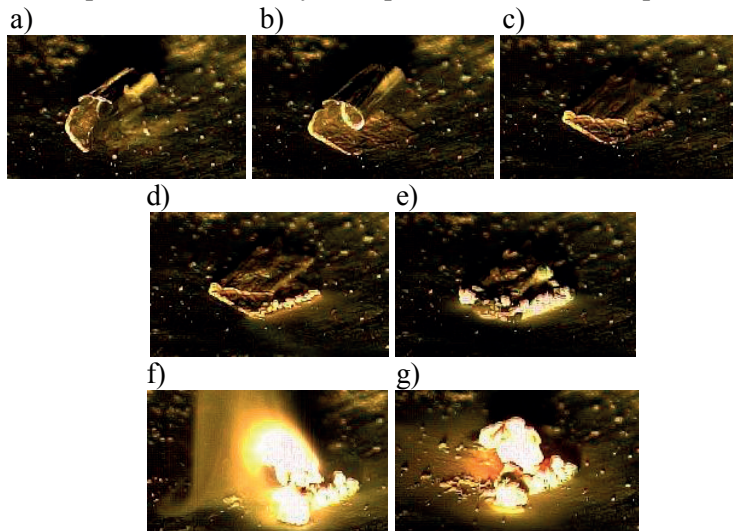
W celach porównawczych, przy pomocy szybkiej kamery Phantom 9.1, określano fazy (etapy) poprzedzające zapłon. Etapy te analizowano dla wybranej frakcji wiórów. Zachowano warunki pomiaru odpowiadające temperaturze z pomiarów wykonywanych wcześniej (tzn. bez zastosowania kamery).

Zapłon wiórów, obserwowany na specjalnej płycie grzewczej, poprzedzony jest silnym uplastycznieniem analizowanego wióra, spowodowanym oddziaływaniem wysokiej temperatury. Na rys. 4.51 oraz rys. 4.52 zaprezentowano fazy poprzedzające zapłon wióra. Przy pomocy kamery wizyjnej, oprócz pomiaru czasu do zapłonu, możliwe jest wyodrębnienie czasu definiowanego jako czas do uplastycznienia wióra. Jest to czas mierzony od momentu styku wióra z powierzchnią płyty grzewczej do momentu jego uplastycznienia. Na rys. 4.51 przedstawiono fazy do zapłonu dla wióra ze stopu AZ31. Analizę prowadzono dla frakcji wiórów otrzymanej przy parametrach technologicznych: $v_c=400 \text{ m/min}$, $f_z=0,15 \text{ mm/strze}$, $a_p=6 \text{ mm}$.



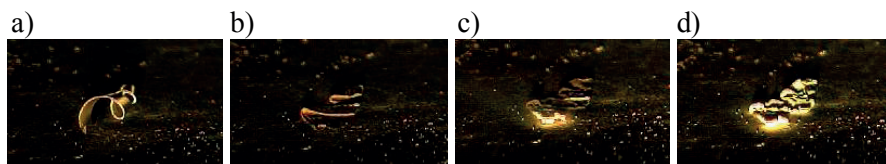
Rys. 4. 51. Kolejne etapy poprzedzające zapłon wióra w przypadku wióra ze stopu AZ31: a) moment styku wióra z płytą grzewczą, b) początkowe uplastycznienie wióra, c) całkowite uplastycznienie wióra, d) początkowy zapłon wióra, e) całkowity zapłon wióra: $v_c=400\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$

Na rys. 4.52 przedstawiono fazy do zapłonu dla wióra ze stopu AZ91HP.



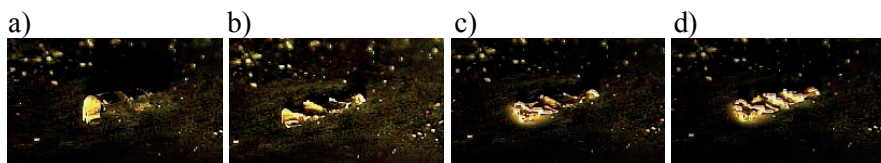
Rys. 4. 52. Kolejne etapy poprzedzające zapłon wióra w przypadku wióra ze stopu AZ91HP: a) moment styku wióra z płytą grzewczą, b) początkowe uplastycznienie wióra, c) całkowite uplastycznienie wióra, d) początkowy zapłon wióra, e) całkowity zapłon wióra, f) spalanie wióra, g) produkty spalania: $v_c=400\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$

Wykonano również analizę etapów poprzedzających zapłon wióra dla parametrów technologicznych: $a_p=1,5\text{mm}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, $v_c=300\text{m/min}$. Pomiar wykonano w celu zobrazowania stanów poprzedzających zapłon wióra. Na rys. 4.53 oraz 4.54 przedstawiono fazy poprzedzające zapłon w/w frakcji wiórów. Na rys. 4.53 przedstawiono fazy poprzedzające zapłon wióra ze stopu AZ31.



Rys. 4. 53. Kolejne etapy poprzedzające zapłon wióra w przypadku wióra ze stopu AZ31:
a) moment styku wióra z płytą grzewczą, b) uplastycznienie wióra, c) początkowy zapłon wióra, d) całkowity zapłon wióra: $a_p=1,5\text{mm}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, $v_c=300\text{m/min}$

Na rys. 4.54 przedstawiono fazy poprzedzające zapłon wóra ze stopu AZ91HP.



Rys. 4. 54. Kolejne etapy poprzedzające zapłon wióra w przypadku wióra ze stopu AZ91HP: a) moment styku wióra z płytą grzewczą, b) uplastycznienie wióra, c) początkowy zapłon wióra, d) całkowity zapłon wióra: $a_p=1,5\text{mm}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, $v_c=300\text{m/min}$

Dodatkowo przeprowadzono próby zapłonu frakcji wiodącej, dla wiórów uzyskanych w następujących warunkach obróbki:

- 1) narzędzie węglikowe z powłoką TiAlN, stop AZ91HP, $v_c=1200\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$,
- 2) narzędzie z ostrzem PKD, stop AZ31, $a_p=0,5\text{mm}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $v_c=800\text{m/min}$.

Próby zapłonu frakcji wiodącej wiórów wykonano poprzez bezpośredni zapłon frakcji pośrednich wiórów (frakcja pośrednia miała za zadanie podpalenie frakcji wiodącej). Próby te przeprowadzono pięciokrotnie dla zadanej frakcji pośredniej wiórów, po czym wymieniano wiór frakcji wiodącej i dokonywano kolejnych prób zapłonu.

W przypadku wiórów uzyskanych dla warunków obróbki z pkt. 1) obserwowano:

- brak zapłonu frakcji wiodącej przez dwie frakcje pośrednie: frakcję pośrednią „b” (o średniej masie $0,0071\text{g}$) oraz frakcję pośrednią „c” (o średniej masie $0,0003\text{g}$),
- zapłon frakcji wiodącej przez frakcję pośrednią „a” (o średniej masie $0,0176\text{g}$ – czyli ok. połowy masy frakcji wiodącej).

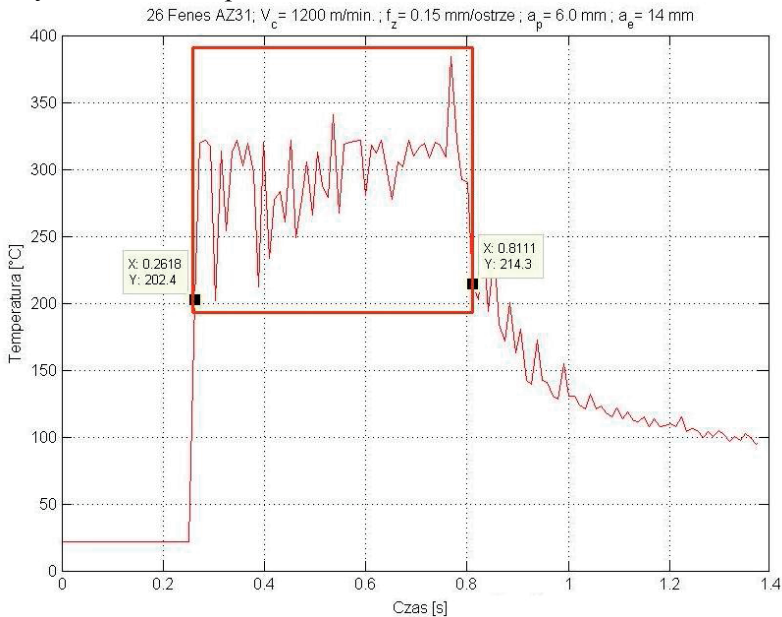
W przypadku wiórów uzyskanych dla warunków obróbki z pkt. 2) nie zaobserwowano zapłonu frakcji wiodącej wiórów, co pozwala na stwierdzenie, że nawet, jeśli podczas obróbki wystąpi niekontrolowany zapłon drobnych frakcji wiórów, nie jest on w stanie dokonać „zaproszenia ognia” pozostałych, większych frakcji wiórów. Pomimo to oczywistym jest, iż należy unikać warun-

ków obróbki powodujących nadmierne fragmentowanie wiórów powodujących oprócz ryzyka zapłonu podczas obróbki, również dodatkowe zanieczyszczenie, zapylenie wnętrza obrabiarki. Należy także uwzględnić fakt, że przy zapłonie $n>1$ wiórów frakcji pośredniej zmieniają się warunki cieplne, wówczas nie można wykluczyć zapłonu frakcji wiodącej.

5.1.6. Wyniki badań temperatury w strefie skrawania

Do analizy temperatury w strefie skrawania wykorzystano wysokiej klasy kamerę termowizyjną Flir SC6000HS. Analizowano temperaturę wióra w funkcji zmiennych parametrów technologicznych frezowania. Przedstawione poniżej wyniki badań w celu lepszego zobrazowania podano oddzielnie dla wszystkich zastosowanych stopów Mg oraz typów narzędzi.

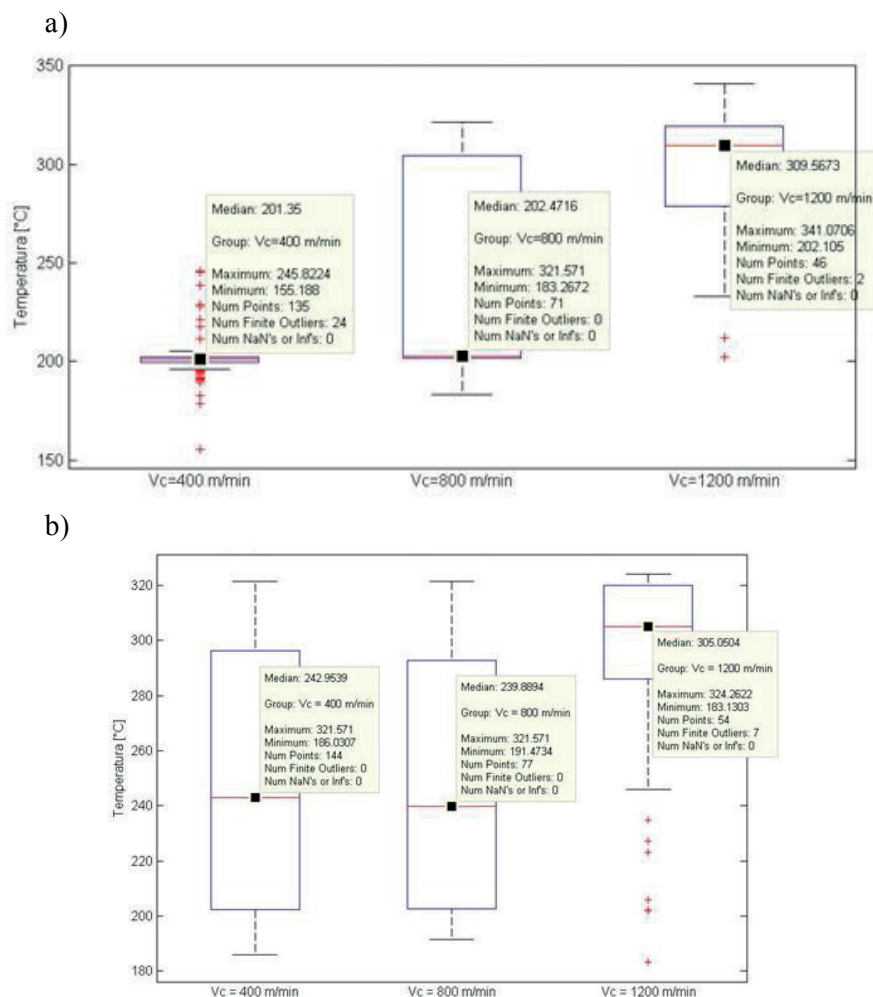
Na rys. 4.55 przedstawiono przykładowy wykres, prezentujący przebieg zmian temperatury wiórów w strefie skrawania dla narzędzia węglikowego z powłoką TiAlN oraz stopu AZ31.



Rys. 4. 55. Przebieg $T=f(t)$ temperatury wióra w strefie skrawania podczas frezowania narzędziem węglikowym z powłoką TiAlN stopu AZ31: $a_p=6\text{mm}$, $f_z=0,15\text{mm/ostrze}$, $v_c=1200\text{m/min}$ [86]

Rysunki (4.56÷4.63) przedstawiają wpływ zmiany parametrów technologicznych frezowania na temperaturę wiórów w strefie skrawania.

Na rys. 4.56 przedstawiono wpływ prędkości skrawania v_c na temperaturę wióra w strefie skrawania w przypadku zastosowania narzędzia węglikowego z powłoką TiAlN podczas frezowania stopów magnezu.



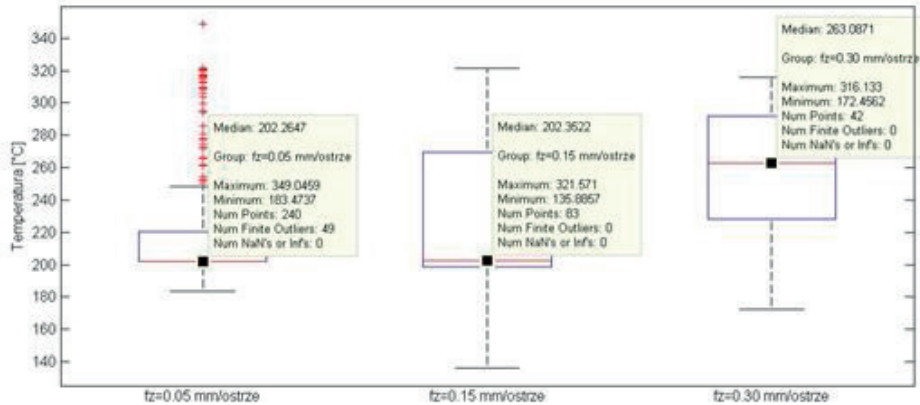
Rys. 4. 56. Wpływ prędkości skrawania v_c na temperaturę wiórów w strefie skrawania – narzędzie węglikowe TiAlN: a) stop AZ31, b) stop AZ91HP; $f_z=0,15\text{mm}$ /ostrze, $a_p=6\text{mm}$ [86]

Jak można zauważyć na rys. 4.56 nie można jednoznacznie wnioskować o wpływie prędkości skrawania v_c na temperaturę wióra w strefie skrawania. Z rys. 4.56a wynika, iż taki wpływ istnieje (wraz ze wzrostem v_c rośnie temperatura wióra), natomiast z rys. 4.56b wynika, że wpływ ten jest w zasadzie pomijalny, gdyż maksymalne temperatury są bardzo zbliżone dla całego zakresu zmiany v_c . W przypadku zastosowania tego typu narzędzia możemy intensyfikować proces frezowania bez obawy ryzyka zapłonu podczas skrawania w przypadku obydwu zastosowanych stopów Mg.

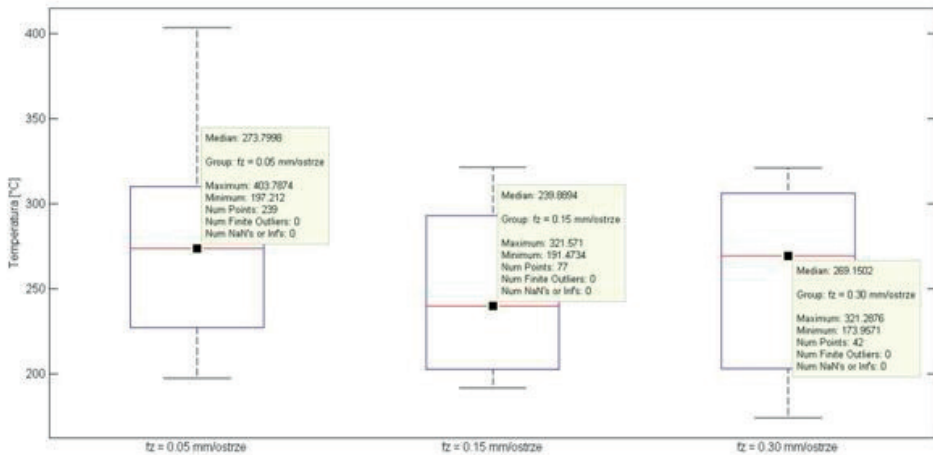
5.1 Wyniki badań

Na rys. 4.57 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze f_z na temperaturę wiórów w strefie skrawania w przypadku zastosowania narzędzia węglkowego z powłoką TiAlN podczas frezowania stopów magnezu.

a)



b)

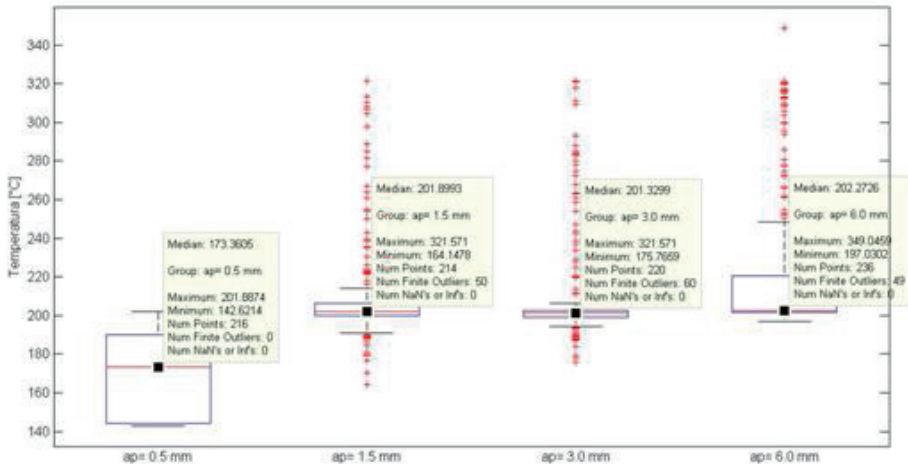


Rys. 4. 57. Wpływ posuwu na ostrze f_z na temperaturę wiórów w strefie skrawania – narzędzie węglkowe TiAlN: a) stop AZ31, b) stop AZ91HP; $v_c=800$ m/min, $a_p=6$ mm [86]

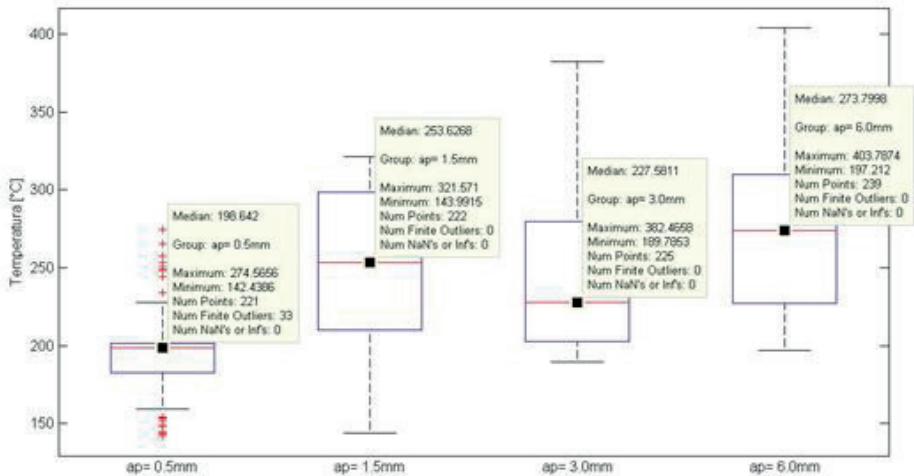
Analizując wpływ posuwu na ostrze f_z na temperaturę wióra w strefie skrawania (rys. 4.57) możemy zauważyć, że: dla stopu AZ31 następuje wzrost, a następnie stabilizacja temperatury w strefie skrawania, natomiast dla stopu AZ91HP wraz ze wzrostem posuwu występuje spadek temperatury wióra. Można to tłumaczyć krótszym „czasem kontaktu” narzędzia z przedmiotem obrabianym. Jest to zjawisko pozytywne w aspekcie ryzyka zapłonu wiórów podczas obróbki na sucho.

Na rys. 4.58 oraz 4.59 przedstawiono wpływ głębokości skrawania a_p na temperaturę wiórów w strefie skrawania w przypadku zastosowania narzędzia węglkowego z powłoką TiAlN. Zastosowano dwa warianty obróbki, tj. z zastosowaniem średniej wartości posuwu $f_z=0,15\text{mm}/\text{ostrze}$ (rys. 4.59) oraz z zastosowaniem minimalnej (w przedstawionych badaniach) wartości $f_z=0,05\text{mm}/\text{ostrze}$ (rys.4.58). Zastosowanie dodatkowej, minimalnej wartości posuwu podyktowane było faktem, iż w przypadku najniższych wartości posuwu, tworzą się frakcje o najmniejszej masie wiórów. Frakcje te jak wiadomo, są najbardziej podatne na zapłon podczas obróbki.

a)

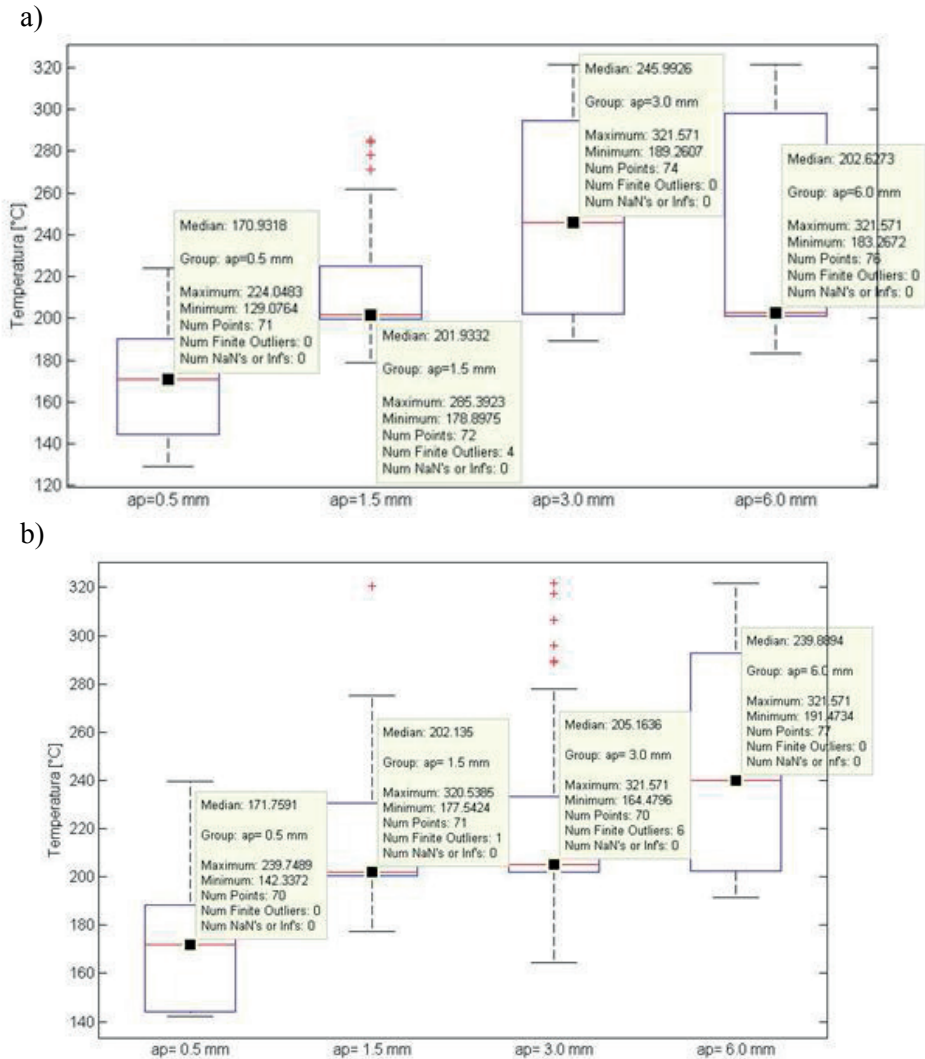


b)



Rys. 4. 58. Wpływ głębokości skrawania a_p na na temperaturę wiórów w strefie skrawania – narzędzie węglkowe TiAlN: a) stop AZ31, b) stop AZ91HP; $a_p=6\text{mm}$, $f_z=0,05\text{mm}/\text{ostrze}$, $v_c=800\text{m}/\text{min}$ [86]

5.1 Wyniki badań

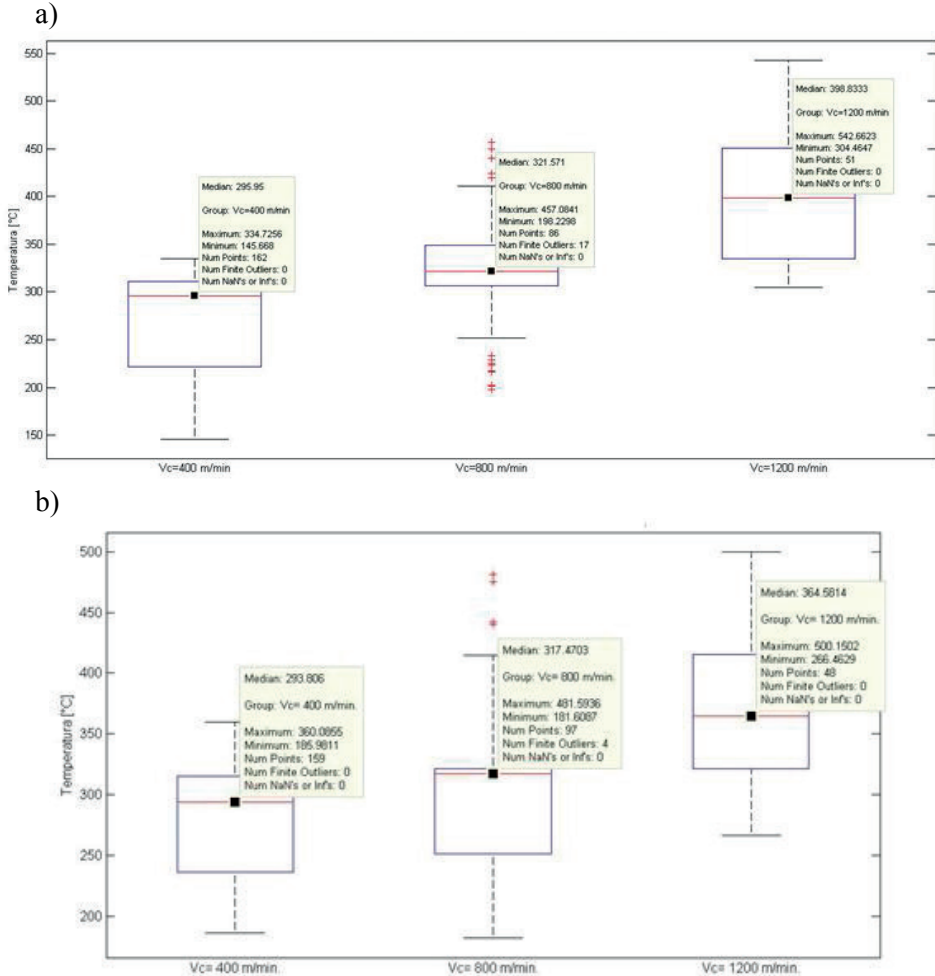


Rys. 4. 59. Wpływ zmiany głębokości skrawania a_p na na temperaturę wiórów w strefie skrawania – narzędzie węglikowe TiAlN: a) stop AZ31, b) stop AZ91HP; $a_p=6\text{mm}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $v_c=800\text{m/min}$ [86]

W powyższych przypadkach (zarówno dla $f_z=0,05\text{mm/ostre}$ jak i $f_z=0,15\text{mm/ostre}$) można zaobserwować tendencję, iż wraz ze wzrostem głębokości skrawania wzrasta temperatura wióra w strefie skrawania. Z przedstawionych danych na rys. 4.58 oraz 4.59 wynika, że wzrost temperatury w przedstawionym zakresie zmiany parametru a_p nie powoduje ryzyka zapłonu wióra podczas obróbki. Jest to istotny aspekt z punktu efektywności realizowanego procesu, gdyż w przypadku zastosowania proponowanego narzędzia oraz podanych gatunków stopów Mg, można realizować proces

obróbki w podanym zakresie głębokości skrawania bez ryzyka „zbliżania się” do temperatury zapłonu.

Na rys. 4.60 przedstawiono wpływ prędkości skrawania v_c na temperaturę wiórów w strefie skrawania w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD podczas frezowania stopów magnezu.



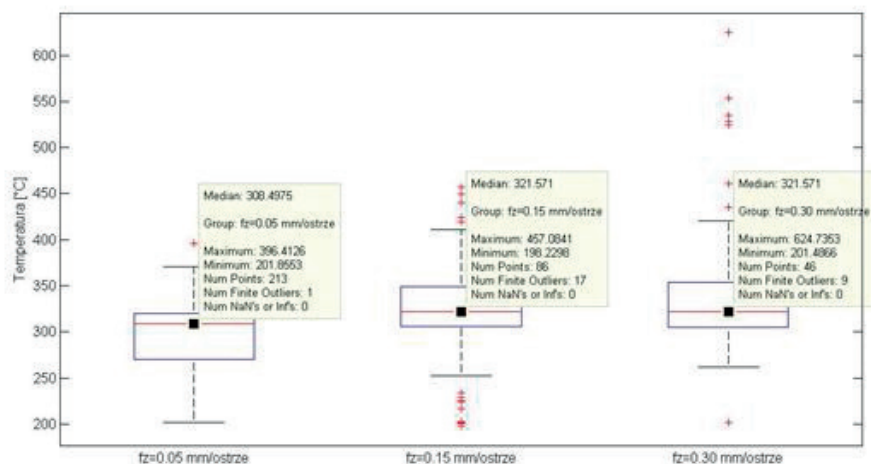
Rys. 4. 60. Wpływ prędkości skrawania v_c na temperaturę wiórów w strefie skrawania – narzędzie z ostrzem PKD: a) stop AZ31, b) stop AZ91HP; $f_z=0,15\text{mm}$ /ostrze, $a_p=6\text{mm}$ [86]

Z przedstawionych wykresów na rys. 4.60 wynika, że może wystąpić ryzyko zapłonu podczas obróbki frezowaniem, zwłaszcza w przypadku prędkości skrawania $v_c=(800\div 1200)\text{m/min}$. W podanym zakresie v_c występuje wzrost temperatury wiórów w strefie skrawania do umownej wartości ($\sim 500^\circ\text{C}$), zbliżonej do temperatury zapłonu wiórów. Bezpieczny obszar obróbki obejmuje jedynie prędkości skrawania $v_c=400\text{m/min}$ w zakresie obydwu stopów Mg, dla

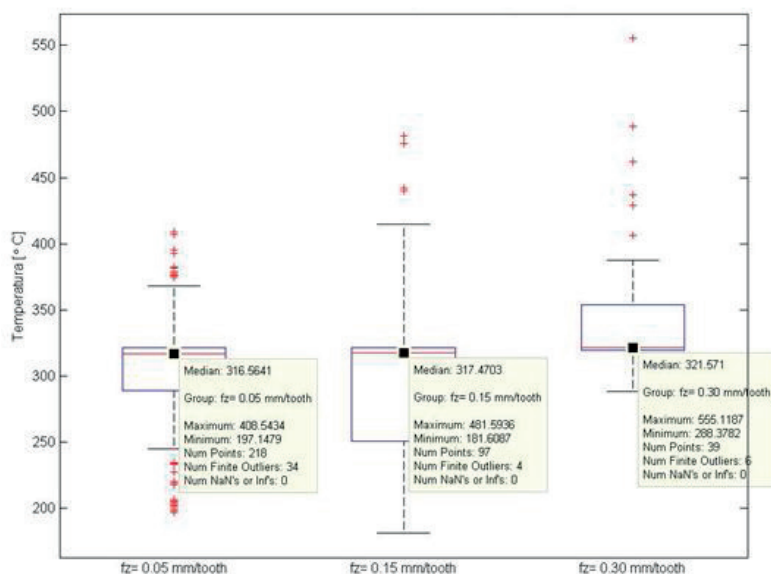
przedstawionego typu narzędzia z ostrzem PKD. Jednak pomimo tak wysokich wartości temperatury w strefie skrawania podczas obróbki nie obserwowano zapłonu wiórów. Jest to istotny fakt z punktu widzenia bezpieczeństwa podczas obróbki.

Na rys. 4.61 przedstawiono wpływ posuwu na ostrze f_z , na temperaturę wiórów w strefie skrawania w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD podczas frezowania stopów magnezu.

a)



b)

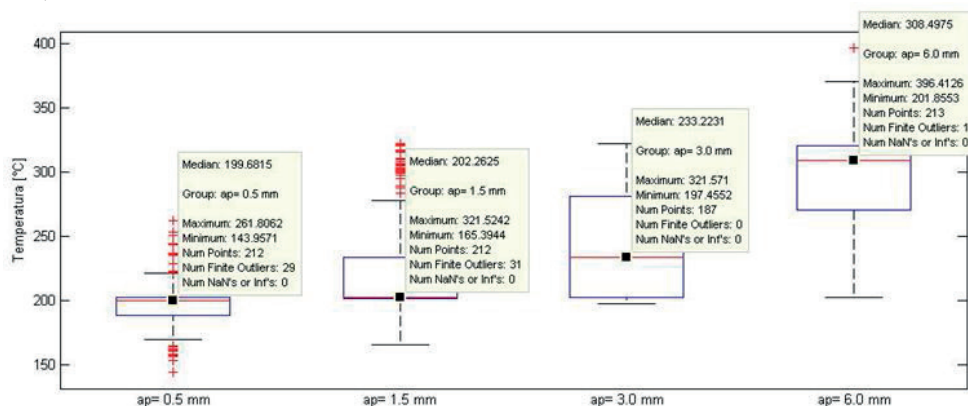


Rys. 4. 61. Wpływ posuwu na ostrze f_z na temperaturę wiórów w strefie skrawania – narzędzie z ostrzem PKD: a) stop AZ31, b) stop AZ91HP; $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [86]

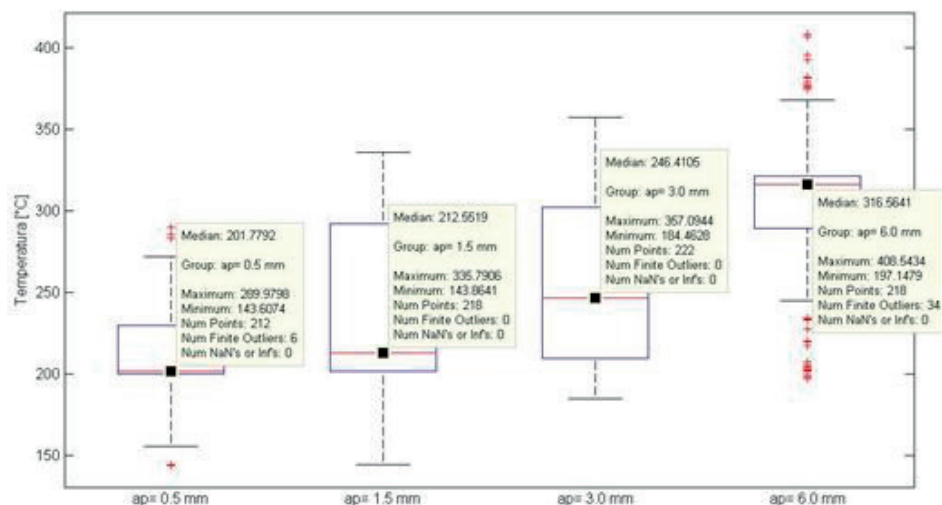
5. Wyniki badań własnych

Analizując wpływ zmiany posuwu na ostrze f_z przedstawiony na rys. 4.61 można zauważyć podobną zależność jak w przypadku zmiany v_c . Bezpieczny zakres obróbki występuje dla $f_z=0,05\text{mm}/\text{ostrze}$. Zwiększając posuw w zakresie $f_z=(0,15\div 0,3)\text{mm}/\text{ostrze}$ możemy spowodować niekontrolowany zapłon podczas obróbki, gdyż obserwowana temperatura wióra w strefie skrawania przekracza umowną temperaturę zapłonu stopów Mg, szacowaną na poziomie ok. 500°C . Pomimo faktu istotnego wzrostu temperatury w strefie skrawania podczas zmiany posuwu f_z , w czasie prowadzenia obróbki nie zaobserwowano niekontrolowanego zapłonu wiórów.

a)



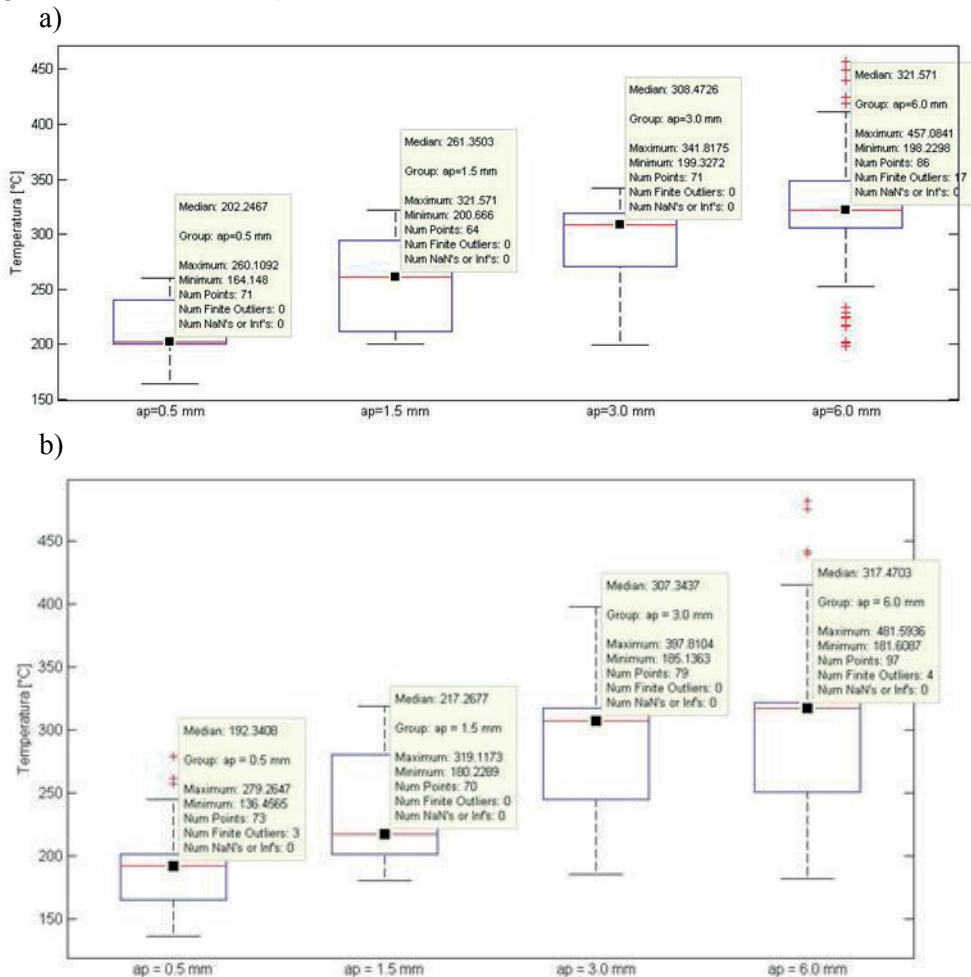
b)



Rys. 4. 62. Wpływ głębokości skrawania a_p na na temperaturę wiórów w strefie skrawania – narzędzie z ostrzem PKD: a) stop AZ31, b) stop AZ91HP; $a_p=6\text{mm}$, $f_z=0,05\text{mm}/\text{ostrze}$, $v_c=800\text{m}/\text{min}$ [86]

Na rys. 4.62 oraz 4.63 przedstawiono wpływ głębokości skrawania a_p na temperaturę wiórów w strefie skrawania w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD podczas frezowania stopów Mg. Zastosowano dwa warianty obróbki, tj. z zastosowaniem średniej wartości posuwu $f_z=0,15\text{mm}/\text{ostrze}$ (rys. 4.63) oraz z zastosowaniem minimalnej (w przedstawionych badaniach) wartości $f_z=0,05\text{mm}/\text{ostrze}$ (rys.4.62).

Podobnie jak w przypadku analizy wyników dotyczących obróbki z zastosowaniem narzędzia węglkowego z powłoką TiAlN, powyższe przypadki zmiany a_p (zarówno dla $f_z=0,05\text{mm}/\text{ostrze}$ jak i $f_z=0,15\text{mm}/\text{ostrze}$) wskazują na tendencję wzrostu temperatury wiórów w strefie skrawania wraz ze wzrostem głębokości skrawania a_p .

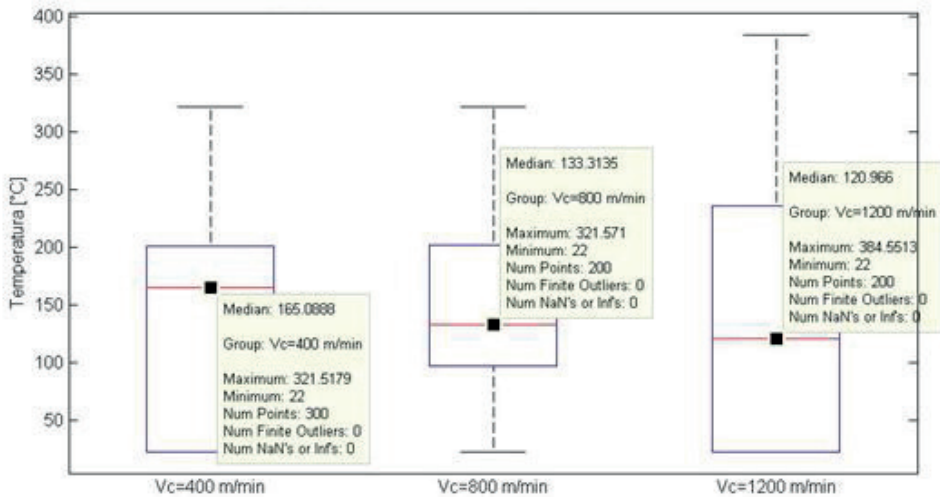


Rys. 4. 63. Wpływ głębokości skrawania a_p na na temperaturę wiórów w strefie skrawania – narzędzie z ostrzem PKD: a) stop AZ31, b) stop AZ91HP; $a_p=6\text{mm}$, $f_z=0,15\text{mm}/\text{ostrze}$, $v_c=800\text{m}/\text{min}$ [86]

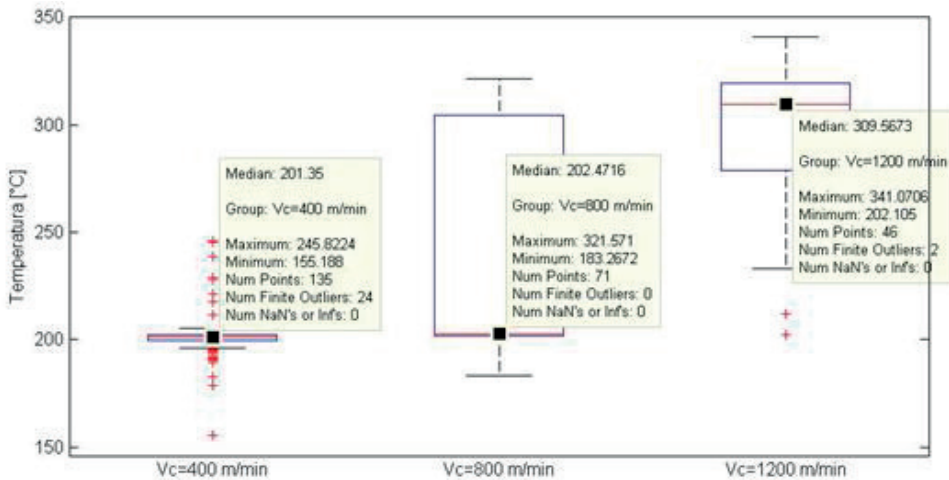
W znacznym zakresie zmiany a_p nie obserwuje się ryzyka związanego z niekontrolowanym wzrostem temperatury, a przez to zapłonu podczas skrawania. Największe wartości temperatury wióra obserwowano przy głębokości skrawania $a_p=6\text{mm}$ i jest ona zbliżona do zakresu temperaturowego $(400\div 450)^\circ\text{C}$. W tym przypadku „wchodzimy” jednak w obszar o zwiększonym ryzyku zapłonu podczas obróbki (obserwowana temperatura niższa o ok. 50°C od temperatury potrzebnej do zainicjowania zapłonu podczas obróbki).

5.1.7. Wyniki badań zjawisk dynamicznych w strefie skrawania podczas pomiaru temperatury wiórów

Z uwagi na zmiany temperatury w strefie skrawania dla wejścia oraz wyjścia narzędzia na rys. 4.64 przedstawiono wykres typu Boxplot dla całkowitej liczby danych z sekwencji zdjęć termicznych, natomiast na rys. 4.65 wykres typu Boxplot dla środkowej części danych. Wyniki te dotyczą frezowania narzędziem węglkowym z powłoką TiAlN stopu AZ31.



Rys. 4. 64. Wpływ prędkości skrawania v_c na temperaturę wiórów w strefie skrawania z uwzględnieniem wszystkich danych z sekwencji – narzędzie węglkowe TiAlN, stop AZ31: $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [86]



Rys. 4. 65. Wpływ prędkości skrawania v_c na temperaturę wiórów w strefie skrawania z uwzględnieniem środkowej części danych – narzędzie węglikowe TiAlN, stop AZ31: $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [86]

Chwilowy wzrost temperatury wiórów w strefie skrawania należy rozpatrywać jako zjawisko losowe. Analizując cały zakres wykorzystanych parametrów technologicznych trudno wytypować obszary, w których mógłby wystąpić nagły wzrost temperatury. W analizowanym przykładzie wzrost taki występuje dla $v_c=400\text{m/min}$ oraz $v_c=1200\text{m/min}$. W pierwszym przypadku jest to wzrost o ok. 37%, w drugim – 11,3% (w porównaniu do obszaru środkowego wykresu typu Boxplot bez punktów odstających). Jest to zjawisko niekorzystne ze względu na niebezpieczeństwo zapłonu podczas obróbki, poprzez chwilowy, lokalny wzrost temperatury. Na uwagę zasługuje również fakt, iż pomimo nagłego, lokalnego wzrostu temperatury w strefie skrawania podczas obróbki narzędziem z ostrzem PKD, podczas obróbki frezowaniem nie wystąpił niekontrolowany zapłon. Płyne stąd ważny wniosek, że nawet losowy, krótkotrwały wzrost temperatury w strefie skrawania nie powoduje zapłonu podczas obróbki. Niemniej jednak należy unikać sytuacji (zakresu parametrów technologicznych) wywołujących gwałtowny wzrost temperatury w strefie skrawania.

W tabeli 4.1 przedstawiono wszystkie wyniki dotyczące obszarów stabilnych (środkowa część sekwencji danych) oraz obszarów, w których mógł wystąpić nagły, chwilowy wzrost temperatury w strefie skrawania. Kolorem czerwonym zaznaczono obszary ze zwiększonym ryzykiem zapłonu wiórów podczas obróbki (obszary, w których zbliżono się lub przekroczone temperaturę określaną jako punkt zapłonu/topnienia stopów Mg, czyli ok. 500°C). Sytuacja taka ma miejsce w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD, w zakresie zmiany prędkości skrawania v_c oraz posuwu na ostrze f_z .

Tab. 4. 1. Dynamiczne zjawiska w strefie skrawania podczas pomiaru temperatury wiórów

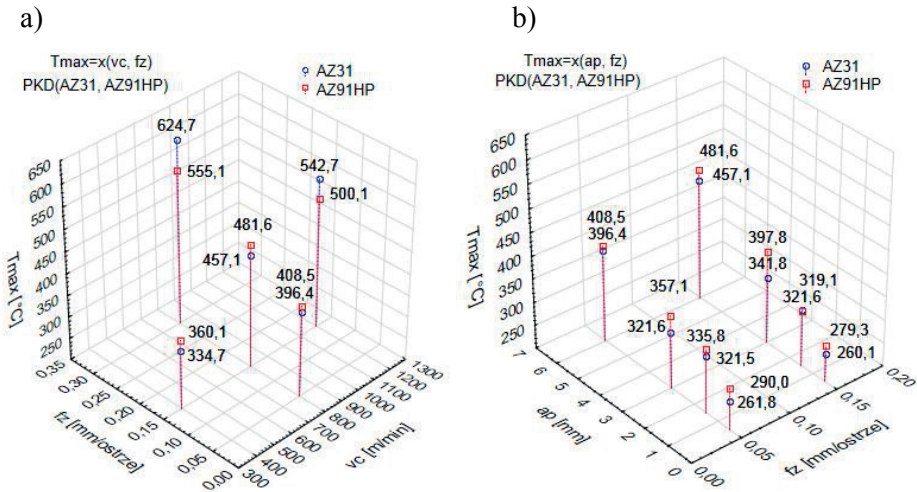
Narzędzie/stop Mg	v_c [mm/min]	f_z [mm/ostrze]	a_p [mm]	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
TiAlN AZ31	400	0,15	6	321,5	245,8	ok.202
TiAlN AZ31	800	0,15	6	321,6	-	321,6
TiAlN AZ31	1200	0,15	6	384,6	-	341,1
TiAlN AZ31	800	0,05	6	349,1	349,1	ok.250
TiAlN AZ31	800	0,15	6	321,6	-	321,6
TiAlN AZ31	800	0,3	6	316,1	-	316,1
TiAlN AZ31	800	0,15	3	321,6	-	321,6
TiAlN AZ31	800	0,15	1,5	285,4	285,4	ok.265
TiAlN AZ31	800	0,15	0,5	224,1	-	224,1
TiAlN AZ31	800	0,05	3	321,6	321,6	ok.202
TiAlN AZ31	800	0,05	1,5	321,6	321,6	ok.215
TiAlN AZ31	800	0,05	0,5	201,9	-	201,9
TiAlN AZ91HP	400	0,15	6	321,6	-	321,6
TiAlN AZ91HP	800	0,15	6	321,6	-	321,6
TiAlN AZ91HP	1200	0,15	6	324,3	-	324,3
TiAlN AZ91HP	800	0,05	6	403,8	-	403,8
TiAlN AZ91HP	800	0,15	6	321,6	-	321,6
TiAlN AZ91HP	800	0,3	6	321,3	-	321,3
TiAlN AZ91HP	800	0,15	3	321,6	321,6	ok.280
TiAlN AZ91HP	800	0,15	1,5	320,5	320,5	ok.280
TiAlN AZ91HP	800	0,15	0,5	239,8	-	239,8
TiAlN AZ91HP	800	0,05	3	382,5	-	382,5
TiAlN AZ91HP	800	0,05	1,5	321,6	-	321,6
TiAlN AZ91HP	800	0,05	0,5	274,6	274,6	ok.230

Oznaczenia zawarte w tabeli:

- T1 – temperatura w strefie skrawania, z uwzględnieniem wejścia oraz wyjścia narzędzia z przedmiotu obrabianego,
- T2 – temperatura w strefie skrawania, z uwzględnieniem tzw. „punktów odstających” od pozostałych wartości pomiaru,
- T3 – temperatura w strefie skrawania, z uwzględnieniem jedynie obszaru stabilnego (ramka-wąsy).

Narzędzie/stop Mg	v_c [mm/min]	f_z [mm/ostrze]	a_p [mm]	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
PKD AZ31	400	0,15	6	334,7	-	334,7
PKD AZ31	800	0,15	6	457,1	457,1	ok.420
PKD AZ31	1200	0,15	6	542,7	-	542,7
PKD AZ31	800	0,05	6	396,4	396,4	ok.365
PKD AZ31	800	0,15	6	457,1	457,1	ok.415
PKD AZ31	800	0,3	6	624,7	624,7	ok.430
PKD AZ31	800	0,15	3	321,6	-	321,6
PKD AZ31	800	0,15	1,5	321,5	321,5	ok.270
PKD AZ31	800	0,15	0,5	261,8	261,8	ok.220
PKD AZ31	800	0,05	3	341,8	-	341,8
PKD AZ31	800	0,05	1,5	321,6	-	321,6
PKD AZ31	800	0,05	0,5	260,1	-	260,1
PKD AZ91HP	400	0,15	6	360,1	-	360,1
PKD AZ91HP	800	0,15	6	481,6	481,6	ok.420
PKD AZ91HP	1200	0,15	6	500,2	-	500,2
PKD AZ91HP	800	0,05	6	408,5	408,5	ok.370
PKD AZ91HP	800	0,15	6	481,6	481,6	ok.420
PKD AZ91HP	800	0,3	6	555,1	555,1	ok.390
PKD AZ91HP	800	0,15	3	397,8	-	397,8
PKD AZ91HP	800	0,15	1,5	319,1	-	319,1
PKD AZ91HP	800	0,15	0,5	279,3	297,3	ok.250
PKD AZ91HP	800	0,05	3	357,1	-	357,1
PKD AZ91HP	800	0,05	1,5	335,8	-	335,8
PKD AZ91HP	800	0,05	0,5	290	290	ok.270

Na kolejnych rysunkach (4.66a oraz 4.66b) przedstawiono wpływ zmiany parametrów technologicznych na maksymalne temperatury jakie występują w strefie skrawania podczas frezowania stopów Mg, narzędziem z ostrzem PKD. Jak łatwo zauważyć, przy maksymalnych parametrach obróbki (jakie udało się uzyskać) „wchodzimy” w obszar niebezpieczny, w którym może wystąpić niekontrolowany zapłon podczas obróbki. W przypadku zastosowania tego typu narzędzia należy unikać stosowania zwiększonych parametrów obróbki. Narzędzie to, ze względu na generowanie tak wysokich temperatur (powyżej 500°C) dedykowane jest w szczególności do obróbki wykończeniowej z mniejszymi nadadkami obróbkowymi.



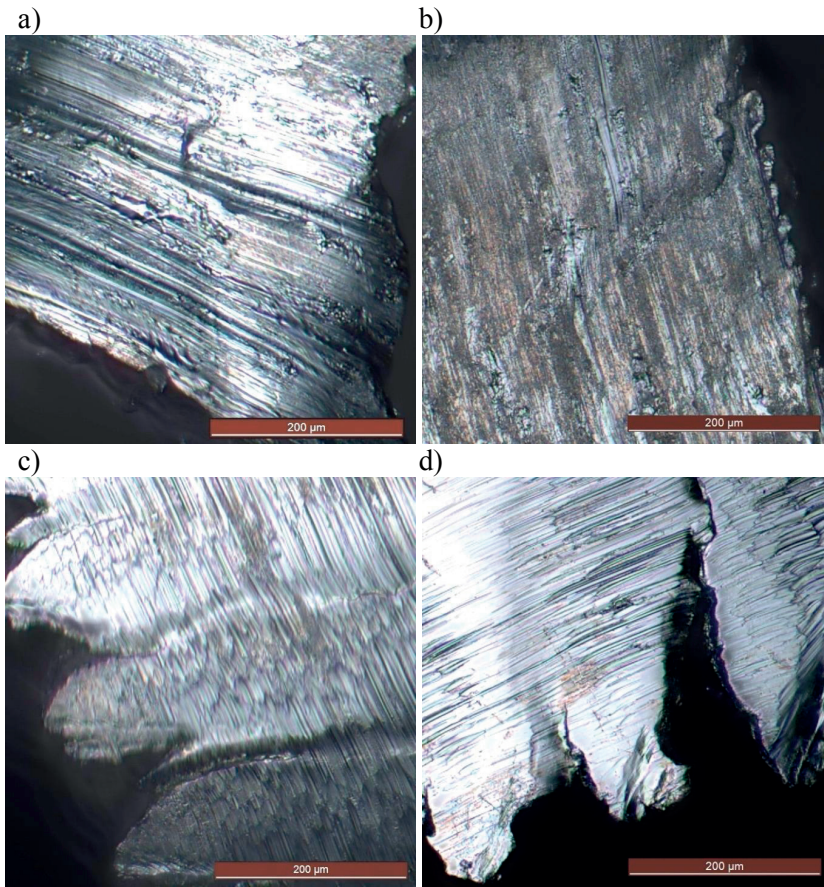
Rys. 4. 66. Maksymalne temperatury obserwowane w strefie skrawania obrazujące występowanie dynamicznych zjawisk w strefie skrawania, podczas frezowania narzędziem z ostrzem PKD: a) wpływ prędkości skrawania v_c (przy $f_z=0,15\text{mm/strzał}$, $a_p=6\text{mm}$) oraz posuwu na ostrze f_z (przy $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$), b) wpływ głębokości skrawania a_p dla wartości posuwu $f_z=0,05\text{mm/strzał}$ oraz $f_z=0,15\text{mm/strzał}$ (przy $v_c=800\text{m/min}$)

Uwzględniając występowanie dynamicznych zjawisk w strefie skrawania oraz analizując parametry technologiczne, zauważyć możemy (rys. 4. 66), iż największy wpływ na wzrost temperatury obserwowanej w strefie skrawania miał posuw na ostrze f_z , następnie prędkość skrawania v_c , a najmniejszy głębokość skrawania a_p .

5.1.8. Wyniki badań morfologii wiórów ze stopów Mg

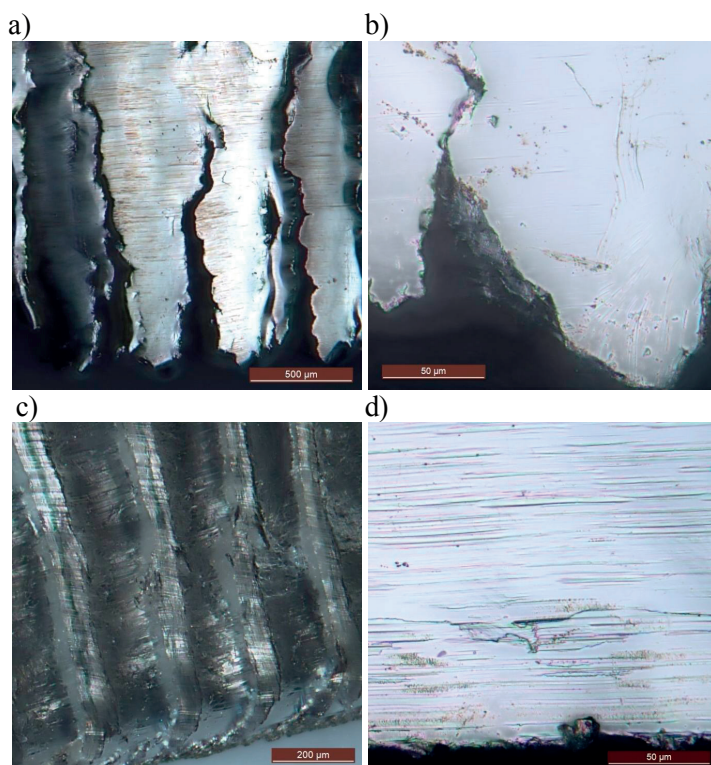
Pomocną w analizie bezpieczeństwa podczas obróbki, staje się analiza metalograficzna uplastycznionych obszarów wiórów. Przy pomocy mikroskopu optycznego Leica DFC450-C analizowano nadtopienia na krawędziach bocznych wiórów ze stopów magnezu. Analiza taka została przeprowadzona dla wiórów otrzymanych przy maksymalnych (w analizowanym eksperymencie) parametrach technologicznych obróbki. Na rys. 4.67, 4.68 oraz 4.69 przedstawiono fotografie wiórów ze stopów magnezu uzyskanych dla maksymalnych wartości prędkości skrawania v_c oraz posuwu na ostrze f_z .

W przypadku wiórów przedstawionych na rys. 4.67 obróbkę prowadzono narzędziem węglkowym z powłoką TiAlN. Nie zaobserwowano charakterystycznych śladów nadtopień lub produktów przypaleń na powierzchniach oraz krawędziach analizowanych wiórów.



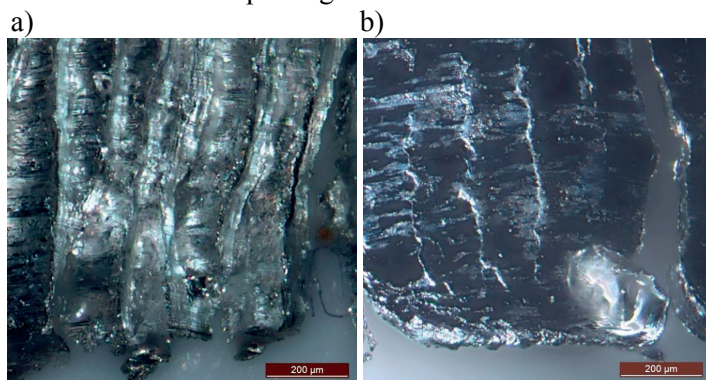
Rys. 4. 67. Metalograficzne fotografie wiórów ze stopów Mg w przypadku stosowania skrajnych parametrów technologicznych obróbki – stop AZ91HP: a) $v_c=1200\text{m/min}$, b) $f_z=0,3\text{mm/ostre}$ oraz stop AZ31: c) $v_c=1200\text{m/min}$, d) $f_z=0,3\text{mm/ostre}$

Dla wiórów przedstawionych na rys. 4.68 oraz 4.69 obróbkę prowadzono narzędziem z ostrzem PKD. Podobnie jak w przypadku narzędzia węglkowego z powłoką TiAlN, nie zaobserwowano śladów nadtopień lub przypaleń na powierzchniach oraz krawędziach analizowanych wiórów. Krawędzie są ostre i wyraźnie zarysowane. Pozwala to na stwierdzenie, że obróbka z zastosowanymi parametrami technologicznymi jest bezpieczna ze względu na brak śladów występowania obszarów silnie uplastycznionych na powierzchni analizowanych wiórów. Na rys. 4.68 przedstawiono wióry ze stopu AZ31.



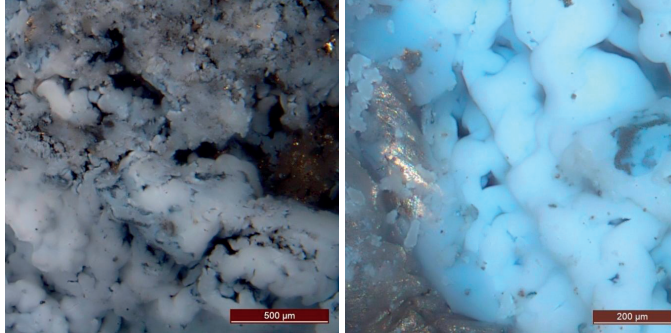
Rys. 4. 68. Metalograficzne fotografie wiórów ze stopów Mg w przypadku stosowania skrajnych parametrów technologicznych obróbki – stop AZ31: a) $f_z=0,3\text{mm}$ /ostrze pow. $\times 50$, b) $f_z=0,3\text{mm}$ /ostrze pow. $\times 500$, c) struktura lamelarna przy $f_z=0,3\text{mm}$ /ostrze, d) $v_c=1200\text{m/min}$

Na rys. 4.69 przedstawiono fotografie wiórów powstałych podczas obróbki narzędziem z ostrzem PKD stopu magnezu AZ91HP.



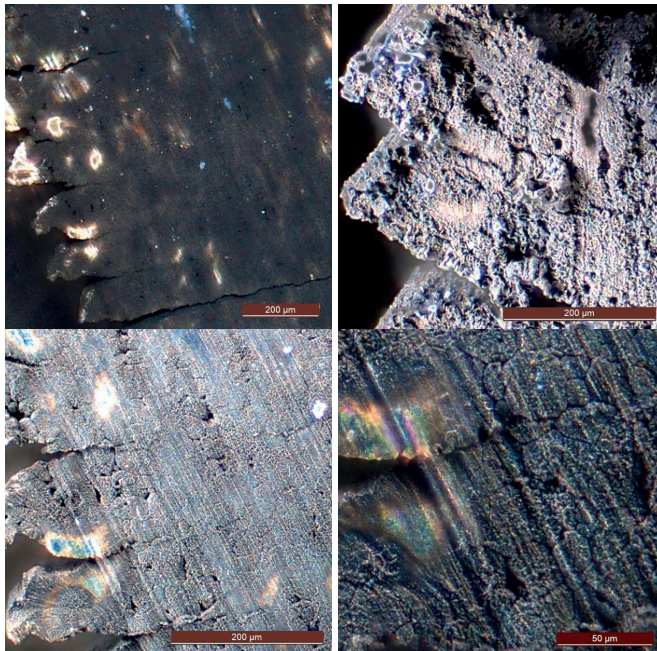
Rys. 4. 69. Metalograficzne fotografie wiórów ze stopów Mg w przypadku stosowania skrajnych parametrów technologicznych obróbki – stop AZ91HP: a) $f_z=0,3\text{mm}$ /ostrze, b) $v_c=1200\text{m/min}$

Na rys. 4.70 przedstawiono fotografie wiórów, które uległy zapłonowi na płycie grzewczej w temperaturze ok. 500°C. Obserwowane fotografie przedstawiają powstałe produkty spalania na powierzchniach wiórów.



Rys. 4. 70. Obserwacje fotografii wiórów poddanych zapłonowi na płycie grzewczej na specjalnym stanowisku badawczym (zapłon obserwowano dla temperatury ok. 500°C)

Na rys. 4.71 przedstawiono fotografie wiórów, poddanych działaniu wysokiej temperatury (ok. 500°C), dla których nie wystąpił zapłon. Powierzchnia obserwowanych wiórów jest znacznie ciemniejsza niż wiórów otrzymanych bezpośrednio po obróbce. Związane jest to z intensywnym utlenianiem powierzchni wióra w kontakcie z gorącą powierzchnią płyty grzewczej.



Rys. 4. 71. Fotografie wiórów poddanych działaniu wysokiej temperatury (ok. 500°C), dla których nie wystąpił zapłon na płycie grzewczej

Z obserwacji analizowanych fotografii wnioskować można, że na powierzchniach wiórów przedstawionych na rys. 4.67÷4.69 nie znaleziono produktów zapłonu lub śladów intensywnego utleniania zaprezentowanych na rys. 4.70 oraz rys. 4.71. Jest to bardzo istotny wniosek z punktu widzenia bezpieczeństwa podczas obróbki frezowaniem na sucho analizowanych stopów magnezu.

5.2. Statystyczne opracowanie wyników badań własnych

Korzystając ze wzoru 3.2 oraz 3.3 oszacowano niepewność pomiaru, dla poszczególnych, analizowanych wskaźników skrawalności. Przykładowe wyniki obliczeń podane poniżej, przedstawiają średnią wartość analizowanego parametru wraz z niepewnością pomiaru u:

- chropowatość powierzchni:
 - TiAlN (AZ91HP, $v_c=150\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$), $Ra=3\pm0,19[\mu\text{m}]$,
 - PKD (AZ31, $v_c=250\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$), $Ra=0,25\pm0,01[\mu\text{m}]$,
- mikrotwardość:
 - PKD (AZ31, $v_c=1200\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$), $x=65,9\pm0,58[\text{HV}]$,
 - TiAlN (AZ31, $f_z=0,3\text{mm/ostre}$, $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$), $x=68,7\pm0,72[\text{HV}]$,
- masa wiórów (na przykładzie frakcji wiodącej wiórów):
 - TiAlN (AZ91HP, $v_c=200\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$), $m=0,0222\pm0,0006[\text{g}]$,
 - PKD (AZ91HP, $v_c=200\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$), $m=0,0286\pm0,0001[\text{g}]$,
- czas do zapłonu:
 - TiAlN (AZ31, $a_p=1,5\text{mm}$, $v_c=300\text{m/min}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$), $t=3,7\pm0,08[\text{s}]$,
 - TiAlN (AZ31, $a_p=0,5\text{mm}$, $v_c=800\text{m/min}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$), $t=6,16\pm0,11[\text{s}]$.

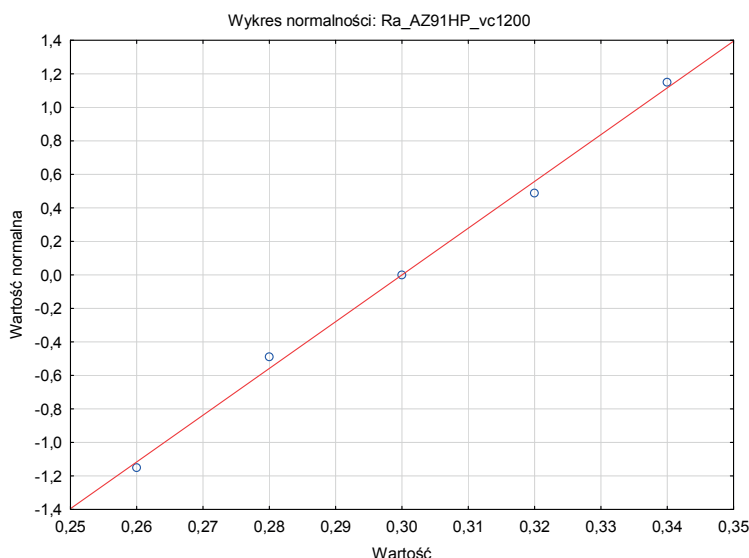
W przypadku szacowania niepewności/błędu pomiaru dotyczącego temperatury płyty grzewczej zastosowano zależność podaną przez producenta miernika: $\pm[0,2\% + 0,6^\circ\text{C}]$. Przykładowe oszacowanie podano poniżej (dla pozostałych przypadków niepewność wyniku pomiaru podano w rozdziale 4.1.5. Wyniki badań czasu do zapłonu wiórów ze stopów Mg):

- TiAlN ($f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$), $T_{\text{max}}=525,4\pm1,7[^\circ\text{C}]$, $T_{\text{sr}}=521,8^\circ\text{C}\pm1,6[^\circ\text{C}]$,
- PKD ($f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$), $T_{\text{max}}=523,2\pm1,6[^\circ\text{C}]$, $T_{\text{sr}}=518,1\pm1,6[^\circ\text{C}]$.

W przypadku pomiaru temperatury przy pomocy kamery termowizyjnej przyjęto całkowity błąd pomiaru kamerą termowizyjną (zgodnie z danymi producenta) na poziomie $\pm 2\%$ zakresu temperatury mierzonej:

- TiAlN (AZ91HP, $v_c=400\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$),
 $T_{\max}=321,6\pm 2,7[^\circ\text{C}]$,
- PKD (AZ31, $v_c=400\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$),
 $T_{\max}=334,7\pm 3,8[^\circ\text{C}]$.

Na rys. 4.72, dla narzędzia z ostrzem PKD, zaprezentowano wykres normalności rozkładu w przypadku analizy parametru R_a .

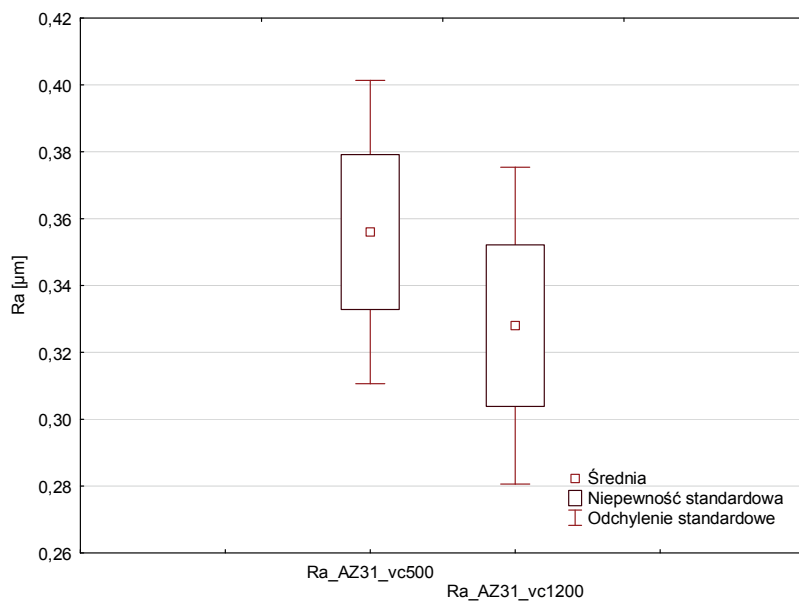


Rys. 4. 72. Wykres normalności rozkładu uzyskany przy pomocy testu Shapiro-Wilka

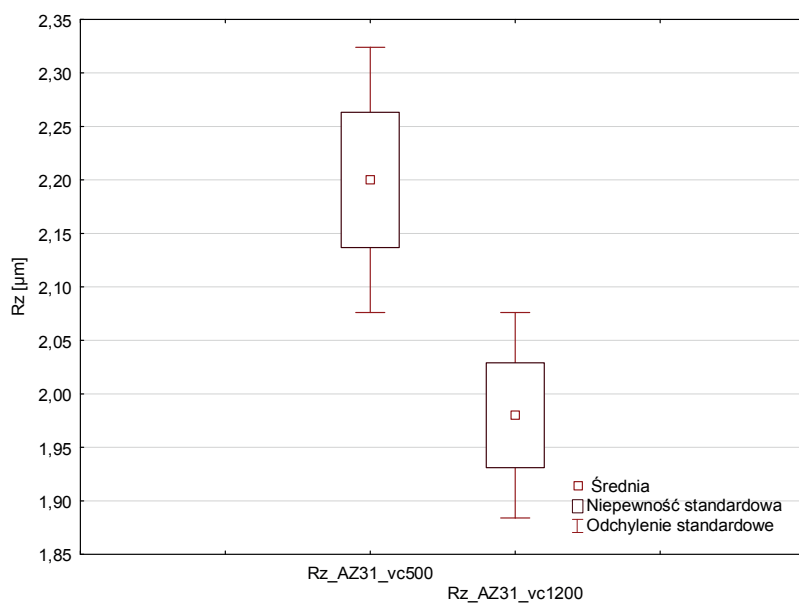
Na rys. 4.73 przedstawiono analizę istotności (na poziomie statystycznym) różnic w przypadku zwiększania prędkości skrawania $v_c=(500\div 1200)\text{m/min}$. Jak widać nie stwierdzono pogorszenia jakości powierzchni na skutek zwiększania prędkości skrawania.

5. Wyniki badań własnych

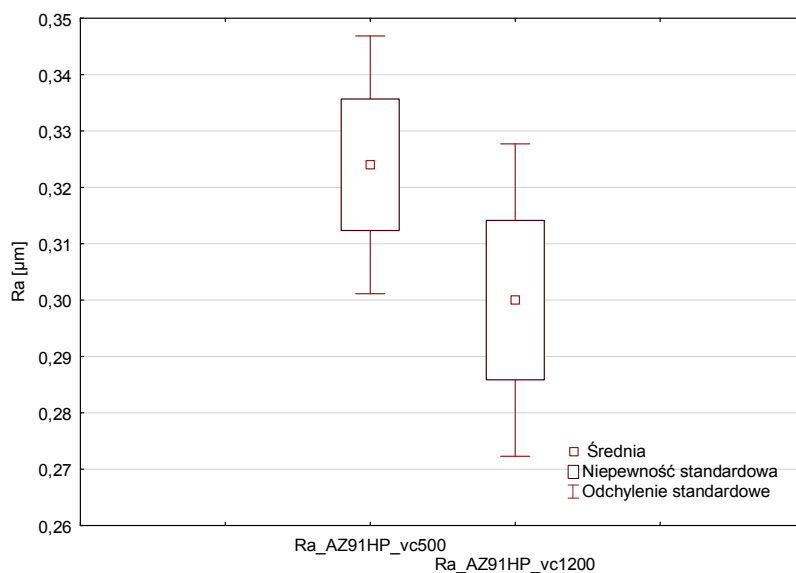
a)



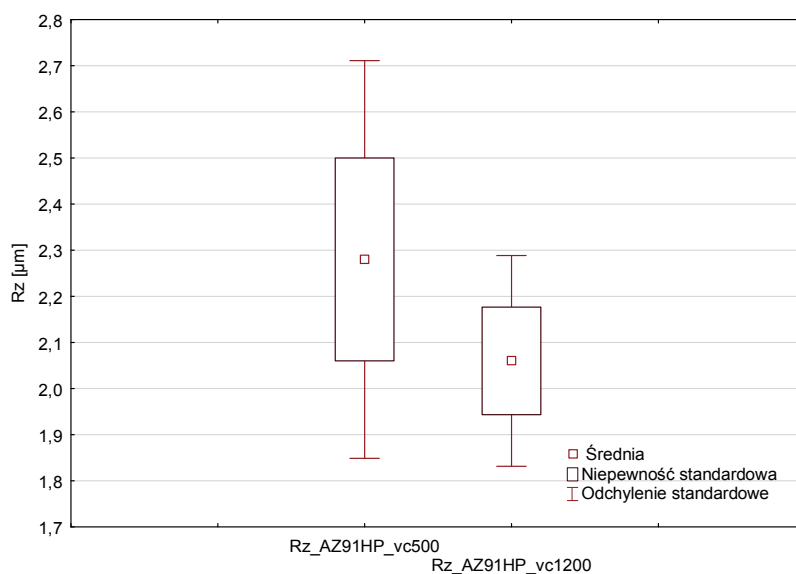
b)



c)



d)



Rys. 4. 73. Wykresy typu "Boxplot" (ramka-wąsy) dla porównania istotności różnic dla średniej wartości parametru Ra oraz RzDIN (testowanie hipotezy o równości wariancji oraz równości średnich) w przypadku zastosowania do obróbki narzędzia z ostrzem PKD – stop AZ31: parametr a) Ra, b) RzDIN; stop AZ91HP: parametr c) Ra, d) RzDIN

5. Wyniki badań własnych

Na rys. 4.74 przedstawiono przykładowe wyniki liczbowe testów istotności dla porównania równości wariancji oraz równości wartości średnich. Jak można zaobserwować średnie oraz wariancje nie różnią się istotnie (na poziomie statystycznym) w przypadku parametru Ra (brak podstaw do odrzucenia hipotezy o równości wariancji oraz hipotezy o równości średnich - patrz również rys. 4.73a). Różnica taka występuje natomiast w przypadku parametru RzDIN (patrz rys. 4.73b), aczkolwiek na korzyść stosowania wyższych prędkości skrawania.

		Testy dla prób niezależnych (Statyst_dr)				
		Uwaga: Zmienne traktowane są jako niezależne próby.				
Grupa 1 wz. Grupy 2		Średnia Grupa 1	Średnia Grupa 2	t	df	p
Ra_AZ31_vc500 vs. Ra_AZ31_vc1200		0,356000	0,328000	0,836660	8	0,427067
		N ważnych Grupa 2	Odch.std Grupa 1	Odch.std Grupa 2	iloraz F Wariancje	p Wariancje
		5	0,051769	0,054037	1,089552	0,935754

		Testy dla prób niezależnych (Statyst_dr)				
		Uwaga: Zmienne traktowane są jako niezależne próby.				
Grupa 1 wz. Grupy 2		Średnia Grupa 1	Średnia Grupa 2	t	df	p
Rz_AZ31_vc500 vs. Rz_AZ31_vc1200		2,200000	1,980000	2,750000	8	0,025059
		N ważnych Grupa 2	Odch.std Grupa 1	Odch.std Grupa 2	iloraz F Wariancje	p Wariancje
		5	0,141421	0,109545	1,666667	0,632813

Rys. 4. 74. Wyniki liczbowe testów istotności do weryfikowania hipotezy o równości wariancji oraz równości średnich

6. DYSKUSJA WYNIKÓW BADAŃ

Wykonana praca jest obszernym studium teoretyczno-eksperymentalnym, dotyczącym obróbki frezowaniem stopów magnezu. Uzyskane rezultaty porządkują rozproszoną wiedzę, czyniąc ją użyteczną dla praktyków, zwłaszcza w kontekście bezpieczeństwa obróbki. Jak wykazano w rozprawie, obawy przez obróbką na sucho stopów magnezu są często przesadne, a stosowane w praktyce technologiczne parametry obróbki zbyt zachowawcze.

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie wielu wniosków i spostrzeżeń zarówno o charakterze poznawczym jak i praktycznym.

Na podstawie przeprowadzonych badań możliwe jest określenie zalecanych wartości parametrów technologicznych frezowania stopów magnezu na sucho. Zakres analizowanych parametrów przedstawiono w tabeli nr 5.1. Zalecane parametry zaznaczono kolorem zielonym „+”, parametry nie zalecane lub parametry o podwyższonym stopniu ryzyka zaznaczono kolorem czerwonym, odpowiednio „-” lub „+/-”. Zalecane parametry technologiczne frezowania przedstawiono w zależności od analizowanych wskaźników skrawalności oraz innych analizowanych wskaźników.

Tab. 5. 2. Zalecane parametry technologiczne frezowania stopów Mg
- chropowatość powierzchni

Rodzaj narzędzia	Gatunek stopu Mg	v _c m/min (f _z =0,15mm/ostrze, a _p =6mm)		f _z mm/ostrze (v _c =300m/min, a _p =6mm) (v _c =800m/min, a _p =6mm)
		150÷400	500÷1200	0,05÷0,3
TiAlN	AZ31	+	+	+
	AZ91HP	+	+	+
PKD	AZ31	+	+	+
	AZ91HP	+	+	+
Kordell	AZ31	+	+	+
	AZ91HP	+	+	+

- **mikrotwardość powierzchni oraz warstwy wierzchniej** – zalecany cały zakres parametrów technologicznych (choć weryfikowano tylko wybrane parametry technologiczne),

6. Dyskusja wyników badań

- siły skrawania

Rodzaj narzędzia	Gatunek stopu Mg	v_c m/min ($f_z=0,15$ mm/ostre, $a_p=6$ mm)			f_z mm/ostre ($v_c=800$ m/min, $a_p=6$ mm)		
		400	800	1200	0,05	0,15	0,3
TiAlN	AZ31						
	AZ91HP						
PKD	AZ31						
	AZ91HP						
Kordell	AZ31						
	AZ91HP						

- masa wiórów / fragmentowanie wiórów

a) obróbka konwencjonalna

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

Rodzaj narzędzia	Gatunek stopu Mg	f_z mm/ostre ($v_c=300$ m/min, $a_p=6$ mm)					
		0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
TiAlN	AZ31						
	AZ91HP						
PKD	AZ31						
	AZ91HP						

Rodzaj narzędzia	Gatunek stopu Mg	a_p mm ($v_c=300$ m/min, $f_z=0,05$ mm/ostre)				
		0,5	1	1,5	2	3
TiAlN	AZ31					
	AZ91HP					
PKD	AZ31					
	AZ91HP					

Rodzaj narzędzia	Gatunek stopu Mg	a_p mm ($v_c=300$ m/min, $f_z=0,15$ mm/ostre)				
		0,5	1	1,5	2	3
TiAlN	AZ31					
	AZ91HP					
PKD	AZ31					
	AZ91HP					

b) obróbka szybkościowa

Rodzaj narzędzia	Gatunek stopu Mg	v_c m/min ($f_z=0,15$ mm/ostrze, $a_p=6$ mm)		
		400	800	1200
TiAlN	AZ31	+	+	+
	AZ91HP	+	+	+
PKD	AZ31	+	+	+
	AZ91HP	+	+	+

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

Rodzaj narzędzia	Gatunek stopu Mg	a_p mm ($v_c=800$ m/min, $f_z=0,05$ mm/ostrze)		
		0,5	1,5	3
TiAlN	AZ31	+	+	+
	AZ91HP	+	+	+
PKD	AZ31	+	+	+
	AZ91HP	+	+	+

Rodzaj narzędzia	Gatunek stopu Mg	a_p mm ($v_c=800$ m/min, $f_z=0,15$ mm/ostrze)		
		0,5	1,5	3
TiAlN	AZ31	+	+	+
	AZ91HP	+	+	+
PKD	AZ31	+	+	+
	AZ91HP	+	+	+

Narzędzie węglkowe o geometrii typu Kordell nie jest zalecane ze względu na występowanie dodatkowego, niekorzystnego zjawiska fragmentowania wiórów, w całym zakresie stosowanych parametrów technologicznych frezowania.

- temperatura w strefie skrawania (na podstawie środkowej części sekwencji danych)

Rodzaj narzędzia	Gatunek stopu Mg	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	AZ31	+	+	+	+	+	+
	AZ91HP	+	+	+	+	+	+
PKD	AZ31	+	+/	+	+	+	+
	AZ91HP	+	+/	+	+	+/	+

Rodzaj narzędzia	Gatunek stopu Mg	a_p mm ($v_c=800$ m/min, $f_z=0,05$ mm/ostrze)				a_p mm ($v_c=800$ m/min, $f_z=0,15$ mm/ostrze)			
		0,5	1,5	3	6	0,5	1,5	3	6
TiAlN	AZ31	+	+	+	+	+	+	+	+
	AZ91HP	+	+	+	+	+	+	+	+
PKD	AZ31	+	+	+	+	+	+	+	+/
	AZ91HP	+	+	+	+	+	+	+	+/

Na podstawie prezentowanych zaleceń, odnośnie możliwości stosowania określonych zakresów parametrów technologicznych frezowania, możliwe jest określenie oraz wytypowanie odpowiadających „czytnikowi” 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 w oparciu o dane zawarte w tabelach 4.1 oraz 5.1.

6.1. Rezultaty poznawcze i praktyczne

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych możliwe jest przedstawienie następujących, ważniejszych wniosków:

- najmniejsze wartości parametrów chropowatości (R_a , R_z DIN) po obróbce frezowaniem uzyskano w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD,
- wpływ prędkości skrawania v_c , dla narzędzia z ostrzem PKD na zmiany chropowatości powierzchni, jest ze statystycznego oraz technologicznego punktu widzenia nieistotny,
- wpływ zmiany posuwu na ostrze f_z , na chropowatość powierzchni, jest najmniejszy dla narzędzia z ostrzem PKD,
- narzędzia bez powłoki charakteryzują się bardziej „ostrą” geometrią, pozwalającą na osiągnięcie wyższej jakości powierzchni niż w przypadku zastosowania narzędzi z powłoką TiAlN,

- ze względu na jakość powierzchni obrobionej najbardziej uniwersalnym narzędziem jest narzędzie z ostrzem PKD, zarówno do obróbki HPC, jak i HSC,
- wpływ rodzaju zastosowanych narzędzi na mikrotwardość (zarówno powierzchni jak i warstwy wierzchniej) jest niewielki,
- w większości przypadków wyższymi wartościami mikrotwardości (zarówno powierzchni jak i warstwy wierzchniej) charakteryzował się stop AZ91HP,
- większy wpływ na siły skrawania oraz ich amplitudy obserwuje się zmieniając posuw na ostrze f_z niż prędkość skrawania v_c ,
- wzrost posuwu na ostrze powoduje w przybliżeniu liniowy przyrost składowych sił skrawania oraz ich amplitud,
- interesujący jest fakt spadku sił skrawania oraz amplitud sił wraz ze wzrostem prędkości skrawania do $v_c=1200\text{m/min}$, w przypadku narzędzi z tzw. "klasyczną geometrią" ostrza,
- 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 przy zmianie posuwu na ostrze f_z , różnice te występowały natomiast w przypadku zmiany prędkości skrawania v_c ,
- charakterystycznym, aczkolwiek w dużej mierze losowym zjawiskiem jest występowanie niestabilnych obszarów krótkotrwałego wzrostu temperatury podczas wejścia oraz wyjścia narzędzia z przedmiotu obrabianego, powodujące dodatkowe zagrożenie samozapłonu wiórów podczas obróbki,
- wzrost parametrów technologicznych frezowania, takich jak prędkość skrawania v_c oraz głębokość skrawania a_p powoduje wzrost temperatury w strefie skrawania,
- zmiana posuwu na ostrze f_z nie wpływa jednoznacznie na temperaturę wiórów w strefie skrawania,
- przedstawione wyniki pomiarów temperatury w strefie skrawania pozwalają zauważyć, że obróbka narzędziem z ostrzem PKD w zakresie wydajnych parametrów skrawania (patrz rys. 4.66 oraz tabela 4.1) może powodować ryzyko zapłonu wiórów podczas frezowania,
- w prezentowanym obszarze parametrów technologicznych frezowania możliwe jest efektywne skrawanie narzędziem węglkowym z powłoką TiAlN, bez ryzyka zapłonu wiórów podczas obróbki (maksymalna temperatura w strefie skrawania, z uwzględnieniem stref niestabilnych wejścia oraz wyjścia narzędzia wyniosła ok. 400°C),
- narzędzia z geometrią typu Kordell powodują znaczne fragmentowanie wiórów, powstawanie frakcji pylistej, co jest niekorzystne z punktu widzenia bezpieczeństwa obróbki,

- zmiana prędkości skrawania v_c nie powoduje istotnej zmiany masy wióra,
- dłuższy czas do zapłonu (w większości przypadków) obserwowano w przypadku analizy wiórów ze stopu odlewniczego AZ91HP, prawdopodobnie ze względu na większą zawartość składników stopowych (tym samym mniejszą ilość czystego Mg).
- czas do zapłonu wiórów wynosił od kilku do kilkunastu sekund, a więc wielokrotnie więcej niż wynosi rzeczywisty czas procesu formowania się wióra, czas ten dla przedziału $v_c=(150\div1200)\text{m/min}$, wynosi odpowiednio $(0,01\div0,001)\text{s}$,
- zapłon wiórów ze stopów Mg poprzedzony jest silnym uplastycznieniem wióra,
- zapłon wiodącej frakcji wiórów poprzez zapalenie pojedynczego wióra frakcji pośredniej jest możliwy, ale tylko w przypadku, gdy masa wióra jest zbliżona do ok. połowy masy frakcji wiodącej, w praktyce oznacza to, że zapłon taki podczas obróbki frezowaniem jest raczej niemożliwy,
- badania mikroskopowe wiórów powstających podczas obróbki z maksymalnymi (w analizowanym eksperymencie) parametrami technologicznymi skrawania, wskazują na ostre, wyraźnie zarysowane fragmenty wiórów, nie obserwuje się charakterystycznych nadtopień wskazujących na niebezpieczny, z punktu widzenia samozapłonu, obszar obróbki,
- fragmentowanie wiórów jest zjawiskiem niekorzystnym, ze względu na większe ryzyko zapłonu drobnych frakcji pośrednich wiórów, zanieczyszczenia przestrzeni obróbkowej oraz negatywne oddziaływanie na zdrowie operatorów maszyn technologicznych,
- ogólnie należy stwierdzić, że w większości przypadków, zwłaszcza przy skrajnych wartościach parametrów technologicznych frezowania, większą fragmentacją wiórów charakteryzował się stop AZ91HP,
- możliwy jest wzrost efektywności wytwarzania (wzrost v_c , wzrost wydajności objętościowej) bez pogorszenia jakości powierzchni finalnej przedmiotów obrabianych w przypadku zastosowania narzędzia z ostrzem PKD,
- pomimo „niskich” temperatur podczas frezowania narzędziem węglkowym z powłoką TiAlN należy unikać stosowania małych głębokości skrawania ze względu na tworzenie dodatkowych pośrednich frakcji wiórów, zwłaszcza frakcji pylistej,
- ze względu na generowanie „wysokich” temperatur w strefie skrawania podczas obróbki narzędziem z ostrzem PKD należy stosować średnie wartości prędkości skrawania v_c i posuwu na ostrze f_z (tj.) oraz nie stosować małych głębokości skrawania a_p ze względu na fragmentowanie wiórów.

6.2. Wnioski końcowe

Przedstawione badania własne pozwalają na stwierdzenie, że hipotezy badawcze postawione w rozprawie zostały zweryfikowane a główne cele osiągnięte.

Przeprowadzone prace udowadniają, że bezpieczny, a jednocześnie efektywny proces frezowania stopów Mg, może być prowadzony przy parametrach znacznie przekraczających te, aktualnie stosowane w przemyśle, zwłaszcza w „produkcji krajowej”. Z analizy autora rozprawy wynika, że typowy zakres prędkości skrawania przy frezowaniu stopów magnezu, w przypadku stosowania frezów trzpieniowych, w przedsiębiorstwach krajowych, aktualnie wynosi ok. $v_c=(50\div150)\text{m/min}$. Przedstawione w rozprawie wyniki wskazują, że zakres ten może być znacznie rozszerzony.

Należy zauważyć, że możliwy do uzyskania podczas obróbki jest głównie zapłon drobnych wiórów oraz pyłu magnezowego.

Można zauważyć, że temperatura w strefie formowania się wióra, podczas obróbki narzędziem węglkowym z powłoką TiAlN, była znacznie niższa od temperatury zapłonu. Nie obserwuje się charakterystycznych nadtopień wierzchołków jakie występują w temperaturze zbliżonej do temperatury zapłonu.

Pomimo przekroczenia podczas frezowania narzędziem z ostrzem PKD, umownej granicy temperatury zapłonu stopów Mg ($\sim 500^\circ\text{C}$), podczas obróbki nie wystąpił zapłon. Można na tej podstawie wnioskować, że czas kontaktu narzędzia z wiórem (czas formowania się wióra), a więc czas narastania (generowania) temperatury w strefie skrawania jest zbyt krótki, aby zainicjować zapłon frakcji wiórów, powstających w podanych warunkach technologicznych frezowania.

Ze względu na fragmentację wiórów, dla wytypowanych narzędzi obróbkowych, należy stosować małe lub średnie wartości posuwu f_z oraz nie stosować małych głębokości skrawania a_p .

Należy również unikać stosowania narzędzi o geometrii powodującej dodatkowe rozdrobnienie (fragmentowanie) wiórów podczas obróbki.

Pomimo stwierdzenia, że w badanym zakresie prędkości skrawania, to jest do 1200m/min , nie wystąpiło niebezpieczeństwo zapłonu wiórów, należy zauważyć, że przy obróbce stopów magnezu zawsze należy zachowywać odpowiednie procedury związane z ochroną ppoż.

Wydaje się, że z punktu widzenia celów rozprawy możliwe są następujące wnioski o znaczeniu fundamentalnym:

1. Przeprowadzone prace doświadczalne wskazują na zależność wartości wskaźników wpływających na bezpieczeństwo obróbki od gatunku stopu Mg,
2. Bezpieczeństwo obróbki stopów Mg jest silnie związane z rodzajem materiału ostrza narzędzia oraz jego cechami geometrycznymi,
3. Frezowanie na sucho stopów Mg jest możliwe i bezpieczne w szerokim zakresie technologicznych parametrów obróbki,
4. Obraz morfologiczny wióra może być ważnym wskaźnikiem bezpieczeństwa obróbki,
5. Chropowatość powierzchni jest w słabym stopniu skorelowana z wartością technologicznych parametrów skrawania stopów Mg ,
6. Zmiana, nawet w szerokim zakresie, technologicznych parametrów frezowania nie wpływa istotnie na mikrotwardość powierzchni i warstwy wierzchniej po obróbce.

SPIS RYSUNKÓW I TABEL

Rys. 1. 1. Porównanie masy właściwej różnych materiałów konstrukcyjnych [91]	12
Rys. 1. 2. Kadłub silnika BMW 3.0 wykonany ze stopu Al. oraz stopu Mg [27, 38]	16
Rys. 1. 3. Typowe zastosowania odlewniczych stopów magnezu wykonywanych na potrzeby przemysłu lotniczego: obudowy a) przekładni, b) sprzęgła, oraz motoryzacyjnego: c) część motocyklowa po powlekanii proszkowym, d) obudowa przekładni kierowniczej [16, 92]	18
Rys. 1. 4. Panel kokpitu sterowania małego samolotu pasażerskiego oraz obudowa skrzyni biegów śmigłowca (stop AZ31B) [97]	19
Rys. 1. 5. Zapłon wiórów ze stopów magnezu AM50A oraz AZ91D podczas frezowania [6, 26]	29
Rys. 1. 6. Obserwacje wiórów ze stopów Mg: a) analiza nadtopień w procesie frezowania stopu magnezu AZ91 [19] oraz b), c) obrazy SEM dla płytkowych struktur lamelarnych wiórów [87]	31
Rys. 1. 7. Powstawanie struktur lamelarnych uzyskanych przy różnych prędkościach skrawania v_c : a) 1200m/min, b) 1600m/min, c) 2400m/min [24]	31
Rys. 1. 8. Ciepło w procesie skrawania: a) rozkład ciepła, b) rozpraszanie ciepła w strefie skrawania [22, 23, 70]	33
Rys. 3. 1. Plan badań obejmujący analizę wskaźników skrawalności	42
Rys. 3. 2. Widok zastosowanych w badaniach centrów obróbkowych	43
Rys. 3. 3. Narzędzia dwu-ostrzowe zastosowane w badaniach: a) frez węglkowy z powłoką TiAlN, b) frez z ostrzem PKD	44
Rys. 3. 4. Rysunek katalogowy frezu o geometrii typu Kordell (geometria U) firmy Sandvik [114]	44
Rys. 3. 5. Profilografometr Surtronic3+ firmy Taylor-Hobson	45
Rys. 3. 6. Schemat rozmieszczenia odcisków wgłębnika przy pomiarach mikrotwardości warstwy wierzchniej stopów magnezu po frezowaniu (z zachowaniem normy PN-EN ISO 6507-1); pomiary wykonywano w przekroju poprzecznym próbki [79]	46
Rys. 3. 7. Widok siłomierza piezoelektrycznego Kistler 9257B z naniesionymi składowymi siłami skrawania [117]	47
Rys. 3. 8. Przykładowe frakcje wiórów w przypadku stopu AZ91HP i narzędzia węglkowego z powłoką TiAlN: a) $v_c=400\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$, b) $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$, c) $a_p=0,5\text{mm}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, $v_c=800\text{m/min}$	48
Rys. 3. 9. Schemat stanowiska do badania palności wiórów	49
Rys. 3. 10. Czujnik temperatury typu 102 [107]	49
Rys. 3. 11. Obraz z kamery termowizyjnej uzyskany przy pomocy oprogramowania IR Control, parametry technologiczne $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [86]	51
Rys. 3. 12. Przykładowy przebieg zmian temperatury w strefie skrawania dla narzędzia węglkowego z powłoką TiAlN oraz stopu AZ31 obejmujący całkowitą liczbę danych z sekwencji zdjęć termicznych (wraz z obszarem wejścia i wyjścia narzędzia) [86]	52

Rys. 3. 13. Przebieg zmian temperatury w strefie skrawania dla narzędzia węglkowego z powłoką TiAlN oraz stopu AZ31 obejmujący środkową część danych [86].....	53
Rys. 3. 14. Schemat wyboru testów służących do oceny istotności różnic [112]	55
Rys. 4. 1. Wpływ prędkości skrawania v_c na chropowatość powierzchni: a) parametr R_a , b) parametr R_z (DIN); $v_c=300\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [80, 83]	58
Rys. 4. 2. Wpływ posuwu na ostrze f_z na chropowatość powierzchni: a) parametr R_a , b) parametr R_z (DIN); $v_c=300\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [80, 83]	59
Rys. 4. 3. Wpływ prędkości skrawania v_c na chropowatość powierzchni: a) parametr R_a , b) parametr R_z (DIN); $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [36]	60
Rys. 4. 4. Wpływ posuwu na ostrze f_z na chropowatość powierzchni: a) parametr R_a , b) parametr R_z (DIN); $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [36].....	61
Rys. 4. 5. Badania porównawcze wpływu narzędzia z powłoką TiAlN i bez powłoki na jakość powierzchni po obróbce; $v_c=400\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [36]	62
Rys. 4. 6. Wpływ parametrów obróbki frezowaniem na mikrotwardość powierzchni po frezowaniu: 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 ($f_z=0,3\text{mm/ostre}$ ($v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$) [79]	63
Rys. 4. 7. Mikrotwardość próbki „bazowej”, parametry obróbki: $a_p=0,5\text{mm}$ $v_c=150\text{m/min}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$	64
Rys. 4. 8. Mikrotwardość warstwy wierzchniej stopów magnezu w przypadku frezowania narzędziem węglkowym z powłoką TiAlN: a) prędkość skrawania $v_c=1200\text{m/min}$ ($f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$), b) posuw na ostrze $f_z=0,3\text{mm/ostre}$ ($v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$)	65
Rys. 4. 9. Mikrotwardość warstwy wierzchniej stopów magnezu w przypadku frezowania narzędziem z ostrzem PKD: a) prędkość skrawania $v_c=1200\text{m/min}$ ($f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$), b) posuw na ostrze $f_z=0,3\text{mm/ostre}$ ($v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$)	66
Rys. 4. 10. Wpływ prędkości skrawania v_c na wartość składowej F_x siły skrawania oraz jej amplitudy AF_x ; $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [81]	68
Rys. 4. 11. Wpływ posuwu na ostrze f_z na wartość składowej F_x siły skrawania oraz jej amplitudy AF_x ; $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [81]	68
Rys. 4. 12. Wpływ prędkości skrawania v_c na wartość składowej F_y siły skrawania oraz jej amplitudy AF_y ; $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [81]	69
Rys. 4. 13. Wpływ posuwu na ostrze f_z na wartość składowej F_y siły skrawania oraz jej amplitudy AF_y ; $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [81]	69
Rys. 4. 14. Wpływ prędkości skrawania v_c na wartość składowej F_z siły skrawania oraz jej amplitudy AF_z ; $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [81]	70
Rys. 4. 15. Wpływ posuwu na ostrze f_z na wartość składowej F_z siły skrawania oraz jej amplitudy AF_z ; $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [81]	71
Rys. 4. 16. Wpływ prędkości skrawania v_c na średnią masę jednostkową wióra: $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [37]	72

Rys. 4. 17. Wpływ posuwu na ostrze f_z na średnią masę jednostkową wióra: $v_c=300\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [37].....	73
Rys. 4. 18. Wpływ posuwu na ostrze f_z na powstawanie pośrednich frakcji wiórów [37].....	73
Rys. 4. 19. Wpływ głębokości skrawania a_p na średnią masę jednostkową wióra: a) $f_z=0,05\text{mm/ostre}$; b) $f_z=0,15\text{mm/ostre}$; $v_c=300\text{m/min}$ [37]	74
Rys. 4. 20. Wpływ głębokości skrawania a_p na powstawanie pośrednich frakcji wiórów: a) $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, b) $f_z=0,15\text{mm/ostre}$ [37]	75
Rys. 4. 21. Wpływ prędkości skrawania v_c na średnią masę jednostkową wióra: $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$	76
Rys. 4. 22. Wpływ prędkości skrawania v_c na powstawanie pośrednich frakcji wiórów.....	77
Rys. 4. 23. Wpływ posuwu na ostrze f_z na średnią masę jednostkową wióra: $v_c=300\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$	78
Rys. 4. 24. Wpływ posuwu na ostrze f_z na powstawanie pośrednich frakcji wiórów	78
Rys. 4. 25. Wpływ głębokości skrawania a_p na średnią masę jednostkową wióra: a) $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, b) $f_z=0,15\text{mm/ostre}$; $v_c=300\text{m/min}$	79
Rys. 4. 26. Wpływ głębokości skrawania a_p na powstawanie pośrednich frakcji wiórów: a) $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, b) $f_z=0,15\text{mm/ostre}$	80
Rys. 4. 27. Wpływ prędkości skrawania v_c na średnią masę jednostkową wióra: $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$	81
Rys. 4. 28. Wpływ prędkości skrawania v_c na powstawanie pośrednich frakcji wiórów.....	82
Rys. 4. 29. Wpływ posuwu na ostrze f_z na średnią masę jednostkową wióra: $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$	82
Rys. 4. 30. Wpływ posuwu na ostrze f_z na powstawanie pośrednich frakcji wiórów	83
Rys. 4. 31. Wpływ głębokości skrawania a_p na średnią masę jednostkową wióra: a) $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, b) $f_z=0,15\text{mm/ostre}$; $v_c=800\text{m/min}$	84
Rys. 4. 32. Wpływ głębokości skrawania a_p na powstawanie pośrednich frakcji wiórów: a) $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, b) $f_z=0,15\text{mm/ostre}$	85
Rys. 4. 33. Wpływ prędkości skrawania v_c na średnią masę jednostkową wióra: $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$	86
Rys. 4. 34. Wpływ prędkości skrawania v_c na powstawanie pośrednich frakcji wiórów.....	87
Rys. 4. 35. Wpływ posuwu na ostrze f_z na średnią masę jednostkową wióra: $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$	87
Rys. 4. 36. Wpływ posuwu na ostrze f_z na powstawanie pośrednich frakcji wiórów	88
Rys. 4. 37. Wpływ głębokości skrawania a_p na średnią masę jednostkową wióra: a) $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, b) $f_z=0,15\text{mm/ostre}$; $v_c=800\text{m/min}$	89
Rys. 4. 38. Wpływ głębokości skrawania a_p na powstawanie pośrednich frakcji wiórów: a) $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, b) $f_z=0,15\text{mm/ostre}$	90
Rys. 4. 39. Wpływ prędkości skrawania v_c na czas do zapłonu frakcji wiodącej wiórów: $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$; $T_{\text{max}}=525,4\pm 1,7^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=521,8\pm 1,6^\circ\text{C}$	92
Rys. 4. 40. Wpływ prędkości skrawania v_c na czas do zapłonu, z uwzględnieniem frakcji pośrednich wiórów: $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$; $T_{\text{max}}=525,4\pm 1,7^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=521,8\pm 1,6^\circ\text{C}$	93

Rys. 4. 41. Wpływ posuwu na ostrze f_z na czas do zapłonu frakcji wiodącej wiórów: $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$; $T_{\text{max}}=529,3\pm 1,7^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=525,8\pm 1,7^\circ\text{C}$	93
Rys. 4. 42. Wpływ posuwu na ostrze f_z na czas do zapłonu, z uwzględnieniem frakcji pośrednich wiórów: $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$; $T_{\text{max}}=529,3\pm 1,7^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=525,8\pm 1,7^\circ\text{C}$	94
Rys. 4. 43. Wpływ głębokości skrawania a_p na czas do zapłonu frakcji wiodącej wiórów: a) $f_z=0,05\text{mm/ostre}$; $T_{\text{max}}=520,8\pm 1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=515,0\pm 1,6^\circ\text{C}$; b) $f_z=0,15\text{mm/ostre}$; $T_{\text{max}}=525,2\pm 1,7^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=521,2\pm 1,6^\circ\text{C}$	95
Rys. 4. 44. Wpływ głębokości skrawania a_p na czas do zapłonu, z uwzględnieniem frakcji pośrednich wiórów: a) $f_z=0,05\text{mm/ostre}$; $T_{\text{max}}=520,8\pm 1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=515,0\pm 1,6^\circ\text{C}$; b) $f_z=0,15\text{mm/ostre}$; $T_{\text{max}}=525,2\pm 1,7^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=521,2\pm 1,6^\circ\text{C}$	96
Rys. 4. 45. Wpływ prędkości skrawania v_c na czas do zapłonu frakcji wiodącej wiórów: $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$; $T_{\text{max}}=523,2\pm 1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=518,1\pm 1,6^\circ\text{C}$	97
Rys. 4. 46. Wpływ prędkości skrawania v_c na czas do zapłonu, z uwzględnieniem frakcji pośrednich wiórów: $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$; $T_{\text{max}}=523,2\pm 1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=518,1\pm 1,6^\circ\text{C}$	98
Rys. 4. 47. Wpływ posuwu na ostrze f_z na czas do zapłonu frakcji wiodącej wiórów: $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$; $T_{\text{max}}=522,7\pm 1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=519,0\pm 1,6^\circ\text{C}$	99
Rys. 4. 48. Wpływ posuwu na ostrze f_z na czas do zapłonu, z uwzględnieniem frakcji pośrednich wiórów: $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$; $T_{\text{max}}=522,7\pm 1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=519,0\pm 1,6^\circ\text{C}$	99
Rys. 4. 49. Wpływ głębokości skrawania a_p na czas do zapłonu frakcji wiodącej wiórów: a) $f_z=0,05\text{mm/ostre}$; $T_{\text{max}}=519,8\pm 1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=514,8\pm 1,6^\circ\text{C}$, b) $f_z=0,15\text{mm/ostre}$; $T_{\text{max}}=515,7\pm 1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=512,0\pm 1,6^\circ\text{C}$	101
Rys. 4. 50. Wpływ głębokości skrawania a_p na czas do zapłonu, z uwzględnieniem frakcji pośrednich wiórów: a) $f_z=0,05\text{mm/ostre}$; $T_{\text{max}}=519,8\pm 1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=514,8\pm 1,6^\circ\text{C}$, b) $f_z=0,15\text{mm/ostre}$; $T_{\text{max}}=515,7\pm 1,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{sr}}=512,0\pm 1,6^\circ\text{C}$	102
Rys. 4. 51. Kolejne etapy poprzedzające zapłon wióra w przypadku wióra ze stopu AZ31: a) moment styku wióra z płytą grzewczą, b) początkowe uplastycznienie wióra, c) całkowite uplastycznienie wióra, d) początkowy zapłon wióra, e) całkowity zapłon wióra: $v_c=400\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$	103
Rys. 4. 52. Kolejne etapy poprzedzające zapłon wióra w przypadku wióra ze stopu AZ91HP: a) moment styku wióra z płytą grzewczą, b) początkowe uplastycznienie wióra, c) całkowite uplastycznienie wióra, d) początkowy zapłon wióra, e) całkowity zapłon wióra, f) spalanie wióra, g) produkty spalania: $v_c=400\text{m/min}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$	103
Rys. 4. 53. Kolejne etapy poprzedzające zapłon wióra w przypadku wióra ze stopu AZ31: a) moment styku wióra z płytą grzewczą, b) uplastycznienie wióra, c) początkowy zapłon wióra, d) całkowity zapłon wióra: $a_p=1,5\text{mm}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, $v_c=300\text{m/min}$	104

Rys. 4. 54. Kolejne etapy poprzedzające zapłon wióra w przypadku wióra ze stopu AZ91HP: a) moment styku wióra z płytą grzewczą, b) uplastycznienie wióra, c) początkowy zapłon wióra, d) całkowity zapłon wióra: $a_p=1,5\text{mm}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, $v_c=300\text{m/min}$	104
Rys. 4. 55. Przebieg $T=f(t)$ temperatury wióra w strefie skrawania podczas frezowania narzędziem węglkowym z powłoką TiAlN stopu AZ31: $a_p=6\text{mm}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $v_c=1200\text{m/min}$ [86].....	105
Rys. 4. 56. Wpływ prędkości skrawania v_c na temperaturę wiórów w strefie skrawania – narzędzie węglkowe TiAlN: a) stop AZ31, b) stop AZ91HP; $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [86]	106
Rys. 4. 57. Wpływ posuwu na ostrze f_z na temperaturę wiórów w strefie skrawania – narzędzie węglkowe TiAlN: a) stop AZ31, b) stop AZ91HP; $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [86].....	107
Rys. 4. 58. Wpływ głębokości skrawania a_p na na temperaturę wiórów w strefie skrawania – narzędzie węglkowe TiAlN: a) stop AZ31, b) stop AZ91HP; $a_p=6\text{mm}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, $v_c=800\text{m/min}$ [86].....	108
Rys. 4. 59. Wpływ zmiany głębokości skrawania a_p na na temperaturę wiórów w strefie skrawania – narzędzie węglkowe TiAlN: a) stop AZ31, b) stop AZ91HP; $a_p=6\text{mm}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $v_c=800\text{m/min}$ [86].....	109
Rys. 4. 60. Wpływ prędkości skrawania v_c na temperaturę wiórów w strefie skrawania – narzędzie z ostrzem PKD: a) stop AZ31, b) stop AZ91HP; $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [86]	110
Rys. 4. 61. Wpływ posuwu na ostrze f_z na temperaturę wiórów w strefie skrawania – narzędzie z ostrzem PKD: a) stop AZ31, b) stop AZ91HP; $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$ [86].....	111
Rys. 4. 62. Wpływ głębokości skrawania a_p na na temperaturę wiórów w strefie skrawania – narzędzie z ostrzem PKD: a) stop AZ31, b) stop AZ91HP; $a_p=6\text{mm}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$, $v_c=800\text{m/min}$ [86].....	112
Rys. 4. 63. Wpływ głębokości skrawania a_p na na temperaturę wiórów w strefie skrawania – narzędzie z ostrzem PKD: a) stop AZ31, b) stop AZ91HP; $a_p=6\text{mm}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $v_c=800\text{m/min}$ [86].....	113
Rys. 4. 64. Wpływ prędkości skrawania v_c na temperaturę wiórów w strefie skrawania z uwzględnieniem wszystkich danych z sekwencji – narzędzie węglkowe TiAlN, stop AZ31: $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [86].....	114
Rys. 4. 65. Wpływ prędkości skrawania v_c na temperaturę wiórów w strefie skrawania z uwzględnieniem środkowej części danych – narzędzie węglkowe TiAlN, stop AZ31: $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$ [86].....	115
Rys. 4. 66. Maksymalne temperatury obserwowane w strefie skrawania obrazujące występowanie dynamicznych zjawisk w strefie skrawania, podczas frezowania narzędziem z ostrzem PKD: a) wpływ prędkości skrawania v_c (przy $f_z=0,15\text{mm/ostre}$, $a_p=6\text{mm}$) oraz posuwu na ostrze f_z (przy $v_c=800\text{m/min}$, $a_p=6\text{mm}$), b) wpływ głębokości skrawania a_p dla wartości posuwu $f_z=0,05\text{mm/ostre}$ oraz $f_z=0,15\text{mm/ostre}$ (przy $v_c=800\text{m/min}$).....	118

Rys. 4. 67. Metalograficzne fotografie wiórów ze stopów Mg w przypadku stosowania skrajnych parametrów technologicznych obróbki – stop AZ91HP: a) $v_c=1200\text{m/min}$, b) $f_z=0,3\text{mm/ostre}$ oraz stop AZ31: c) $v_c=1200\text{m/min}$, d) $f_z=0,3\text{mm/ostre}$	119
Rys. 4. 68. Metalograficzne fotografie wiórów ze stopów Mg w przypadku stosowania skrajnych parametrów technologicznych obróbki – stop AZ31: a) $f_z=0,3\text{mm/ostre}$ pow. x50, b) $f_z=0,3\text{mm/ostre}$ pow. x500, c) struktura lamelarna przy $f_z=0,3\text{mm/ostre}$, d) $v_c=1200\text{m/min}$	120
Rys. 4. 69. Metalograficzne fotografie wiórów ze stopów Mg w przypadku stosowania skrajnych parametrów technologicznych obróbki – stop AZ91HP: a) $f_z=0,3\text{mm/ostre}$, b) $v_c=1200\text{m/min}$	120
Rys. 4. 70. Obserwacje fotografii wiórów poddanych zapłonowi na płycie grzewczej na specjalnym stanowisku badawczym (zapłon obserwowano dla temperatury ok. 500°C).....	121
Rys. 4. 71. Fotografie wiórów poddanych działaniu wysokiej temperatury (ok. 500°C), dla których nie wystąpił zapłon na płycie grzewczej	121
Rys. 4. 72. Wykres normalności rozkładu uzyskany przy pomocy testu Shapiro-Wilka	123
Rys. 4. 73. Wykresy typu "Boxplot" (ramka-wąsy) dla porównania istotności różnic dla średniej wartości parametru Ra oraz RzDIN (testowanie hipotezy o równości wariancji oraz równości średnich) w przypadku zastosowania do obróbki narzędzia z ostrzem PKD – stop AZ31: parametr a) Ra, b) RzDIN; stop AZ91HP: parametr c) Ra, d) RzDIN	125
Rys. 4. 74. Wyniki liczbowe testów istotności do weryfikowania hipotezy o równości wariancji oraz równości średnich	126
Tab. 1. 1. Podstawowe właściwości fizyczne i chemiczne magnezu [16, 55]	13
Tab. 1. 2. Skład chemiczny oraz właściwości stopów magnezu [82, 118].....	15
Tab. 3. 1. Skład chemiczny wytypowanych stopów magnezu [118, 123, 124]	43
Tab. 3. 2. Ważniejsze warunki badań eksperymentalnych [86].....	50
Tab. 4. 1. Dynamiczne zjawiska w strefie skrawania podczas pomiaru temperatury wiórów	116
Tab. 5. 2. Zalecane parametry technologiczne frezowania stopów Mg	127

LITERATURA

- [1] Abukhshim N.A., Mativenga P.T., Sheikh M.A.: *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] Adamiec J.: *Spawalność odlewniczych stopów magnezu*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
- [3] Adamski W.: *Manufacturing development strategies in aviation industry*, Advances in Manufacturing Science and Technology, Vol. 34, No. 3, 2010.
- [4] Adamski W.: *Wybrane kierunki zwiększania wydajności procesów skrawania*, Mechanik 5-6/2009, s. 540–546.
- [5] Adamski W.: *Wybrane problemy projektowania i wytwarzania CAD/CAM w przemyśle maszynowym*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2012.
- [6] 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.
- [7] Arai M., et al.: *Chip Control in Finish Cutting of Magnesium Alloy*, Journal of Materials Processing Technology 62, 1996, s. 341–344.
- [8] Avedesian M.M., Baker H.: *Magnesium and Magnesium Alloys; Fabrication, Finishing and Inspection: Machining*, ASM International Handbook Committee, 1999, s. 127–137.
- [9] 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.
- [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] Blawert 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.
- [12] Chodorowski J., Ciszewski A., Radomski T.: *Materiałoznawstwo lotnicze*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1980.
- [13] Danilenko B.D.: *Selecting the Initial Cutting Parameters in Machining Magnesium Alloys*, Russian Engineering Research, 2009, Vol. 29, No. 3, s. 316–318.
- [14] Denkena B., et al.: *Safe Machining of Magnesium Parts by Cutting and Burnishing Operations*, Magnesium Proceedings of the 6th International Conference Magnesium Alloys and Their Applications, Edited by K.U. Kainer, Weinheim 2003.
- [15] Denkena B., et al.: *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.

- [16] Dobrzański L.A.: *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Gliwice 2002.
- [17] Dobrzański L.A., i inni.: *Struktura i własności stopów Mg-Al-Zn*, Scientific International Journal of the World Academy of Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 5, No.11, 2012.
- [18] Dziubińska A., Gontarz A.: *Innowacyjne rozwiązania kształtowania odkuwek wsporników wykorzystywanych w przemyśle lotniczym*, Monografia "Wybrane zagadnienia z budowy i eksploatacji maszyn" pod red. L. Gardyńskiego i M. Szali, Lublin 2013, s. 34–48.
- [19] 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.
- [20] Fajkiel A., i inni.: *Nowoczesne stopy oraz metody odlewania magnezu w zastosowaniach motoryzacyjnych*, Przegląd Mechaniczny, 2/2009, s. 30-35.
- [21] Gontarz A., i inni.: *Badania teoretyczno-doświadczalne procesu kucia matrycowego stopów magnezu*, Mechanik 8-9/2013, s. 646–657.
- [22] Górski E.: *Obróbka skrawaniem*, Wyd. Szkolne i Pedagogiczne, 1972.
- [23] Grzesik W.: *Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych*, WNT, Warszawa 2010.
- [24] 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.
- [25] Hadasik E., Kuc D., Szulą A.: *Kształtowanie plastyczne stopu magnezu AZ31*, Rudy i Metale Nieżelazne, 6/2010, s. 313–317.
- [26] Hou J.Z., Zhou W., Zhao N.: *Methods for Prevention of Ignition during Machining of Magnesium Alloys*, Key Engineering Materials, Vol. 447–448, 2010, s. 150–154.
- [27] Idzior M.: *Kierunki zmian materiałowych w motoryzacji w świetle wymogów ekologii*, MOTROL, 9/2007, s. 72-87.
- [28] Jakubiec W., Malinowski J.: *Metrologia wielkości geometrycznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2004.
- [29] Jądrzyk P.: *Obróbka stopów magnezu narzędziami firmy MAPAL*, Mechanik, 3/2008, s. 186–187.
- [30] Jemielniak K.: *Obróbka skrawaniem*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
- [31] Kaczmarek J.: *Podstawy obróbki wiórowej, ściernej i erozyjnej*, WNT, 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] Korkut I., et al.: *Investigation of chip-back temperature during machining depending on cutting parameters*, Materials and Design 28, 2007, s. 2329–2335.
- [34] Korzyński M.: *Metodyka eksperymentu*, WNT, Warszawa 2006.

- [35] Kuczmazewski J.: *Efektywność wytwarzania elementów lotniczych ze stopów aluminium i magnezu*, Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie, Oficyna Wyd. 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] Kulecki M.K.: *Magnesium and its alloys applications in automotive industry*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 39, 2008, s. 851–865.
- [39] Langner R.: *Materiały i cechy geometryczne narzędzi stosowanych do obróbki skrawaniem stopów lotniczych*, Raport 2009, POIG. 01.01.02-00-015/08-00.
- [40] Latour A.: *Skrawalność metali i metody jej określania*, WNT 1962.
- [41] Legutko S.: *Eksploatacja maszyn*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2007.
- [42] Legutko S.: *Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń*, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2013.
- [43] Legutko S.: *Trendy rozwoju utrzymania ruchu urządzeń i maszyn*, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, Nr 2, Vol. 42, 2009, s. 8–16.
- [44] Lin B.T., Kuo Ch.: *Application of an integrated RE/RP/CAD/CAE/CAM system for magnesium alloy shell of mobile phone*, No 6, 2009, s. 2818–2830.
- [45] Lin P.-Y., et al.: *Interactive effect of cerium and aluminum on the ignition point and the oxidation resistance of magnesium alloy*, Corrosion Science, No. 50, 2008, s. 2669–2675.
- [46] Liu M., et al.: *The ignition temperature of Mg alloys WE43, AZ31 and AZ91*, Corrosion Science, No. 54, 2012, s. 139–142.
- [47] Lucci R., et al.: *Possibilities of recovering AZ91 magnesium alloy from machining shavings contaminated with oil, through their fusion with argon gas protection*, Procedia Materials Science, No. 1, 2012, s. 44–49.
- [48] Łunarska S., Opiekun Z., Sieniawski J.: *Materiałoznawstwo lotnicze*, praca zbiorowa pod red. A. Bylicy, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1980.
- [49] Miernik M.: *Skrawalność metali. Metody określania i prognozowania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [50] Miernikiewicz A., Przybylski L.: *Temperatura skrawania, Część 2. Temperatura wióra. Badania doświadczalne*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, Vol.24, Nr 2, 2004.
- [51] Minkina W.: *Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody*, Wydawn. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.

- [52] Obermair F.: *High Speed Minimum Quantity Lubrication Machining of Magnesium*, Magnesium Proceedings of the 6th International Conference Magnesium Alloys and Their Applications, Edited by K.U. Kainer, Weinheim 2003.
- [53] Oczoś K.E.: *Efektywne skrawanie stopów magnezu*, *Mechanik*, 7/2000, s. 467–474.
- [54] Oczoś K.E.: *Rozszerzenie granic stosowalności stopów magnezu*, *Mechanik*, 5–6/2009, s. 386–400.
- [55] Oczoś K.E., Kawalec A.: *Kształtowanie metali lekkich*, PWN, Warszawa 2012.
- [56] Orman M., Orman Z.: *Technologia magnezu i jego stopów*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1965.
- [57] 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.
- [58] O'Sullivan D., Cotterell M.: *Temperature measurement in single point turning*, *Journal of Materials Processing Technology*, No. 118, 2001, s. 301–308.
- [59] Piątkowski J., Binczyk F.: *Właściwości i zastosowanie odlewniczych stopów Mg-Al.*, *Archiwum Odlewnictwa*, PAN Katowice, No. 4, 2002, s. 426–433.
- [60] Praca zbiorowa pod red. Tadeusza R. Fodemskiego: *Pomiary cieplne, Część I, Podstawowe pomiary cieplne*, WNT, Warszawa 2001.
- [61] Praca zbiorowa pod red. W. Minkiny: *Wybrane problemy współczesnej termowizji i termometrii w podczerwieni*, Wydawn. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2011.
- [62] Ravi Kumar N.V., et al.: *Effect of alloying elements on the ignition resistance of magnesium alloys*, *Scripta Materialia*, No. 49, 2003, s. 225–230.
- [63] Reguła T., i inni: *Ocena możliwości kształtowania właściwości mechanicznych odlewniczego stopu magnezu AZ91 przez zastosowanie odpowiedniej obróbki cieplnej*, *Prace Instytutu Odlewnictwa* No 1, 2008, T. 48.
- [64] Reguła T., i inni: *Ocena skuteczności specjalnej obróbki cieplnej stopu magnezu AZ91 zapobiegającej rozrostowi ziarna*, *Prace Instytutu Odlewnictwa* No. 4, 2008, T. 48.
- [65] 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.
- [66] Semotiuk L.: *Analiza cech eksploatacyjnych innowacyjnych konstrukcji narzędzi wykorzystywanych w procesach frezowania zgrubnego z wykorzystaniem technologii HSM*, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, Nr 1, Vol. 41, 2009, s. 46–53.
- [67] Sobczyk M.: *Statystyka*, PWN, Warszawa 2001.

- [68] Sprus M.: *Narzędzia do obróbki materiałów konstrukcyjnych o zredukowanej masie*, Cz. 1, Mechanik, 11/2007, s. 926–929.
- [69] Sprus M.: *Standardowe narzędzia diamentowe PKD*, Mechanik, No. 2, 2007, s. 96–98.
- [70] Storch B.: *Podstawy obróbki skrawaniem*, Wydawn. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2001.
- [71] Tharumarajah A., Koltun P.: *Is there an environmental advantage of using magnesium components for light-weighting cars?*, "Journal of Cleaner Production", 15/2007, s. 1007–1013.
- [72] Tönshoff H.K., et al.: *Magnesium Technology, Technology of magnesium and magnesium alloys: Machining*, Edited by Friedrich H.E., Mordike B.L., "Springer" 2006, s. 398–418.
- [73] Tönshoff H.K., Winkler J.: *The influence of tool coatings in machining of magnesium*, Surface and Coatings Technology 94-95, 1997, s. 610–616.
- [74] Tomac N., Tonnessen K., Mikac T.: *Study of Influence of Aluminium Content on Machinability of Magnesium Alloys*, Strojarsstvo 50, 6/2008, s. 363–367.
- [75] 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.
- [76] Weinert K., et al.: *Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 53, Iss. 2, 2004, s. 511–537.
- [77] Włodarczyk M.: *Badania wpływu niedoklejenia na wytrzymałość zakładkowych połączeń klejowych - Rozprawa Doktorska*, Lublin 2013
- [78] Yang Z., et al.: *Review on research and development of magnesium alloys*, Acta Metallurgica Sinica (English Letters), Vol.21, No.5, 2008, s. 313–328.
- [79] Zagórski I., Kuczmazewski J.: *Badania mikrotwardości stopów magnezu po szybkościowym frezowaniu na sucho*, Mechanik 8-9/2013, s. 720–724.
- [80] Zagórski I., Kuczmazewski J.: *Selected problems of effectiveness of processing of magnesium alloys with a Kordell design toll*, Mper, 4/2011, s. 90–96.
- [81] Zagórski I., Kuczmazewski J.: *The study of cutting forces and their amplitudes during high-speed dry milling magnesium alloys*, Postępy nauki i techniki - Advances in Science and Technology-Research Journal, Vol. 7, No. 20, 2013, s. 61–66.
- [82] Zagórski I., Pieśko 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.
- [83] Zagórski I., Pieśko P.: *Badania porównawcze chropowatości powierzchni wybranych stopów magnezu po frezowaniu narzędziem pełno-węglkowym oraz PKD*, IV Międzynarodowe Sympozjum Naukowe, Postęp w technikach wytwarzania i konstrukcji maszyn pod red. G. Borowskiego, Lublin 2011, s. 53–58.

- [84] Zaleski K.: *Laboratorium obróbki ubytkowej*, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2001.
- [85] Zalewski A.: *Efektywne wytwarzanie dzięki optymalnej strategii obróbki HSM*, Polskie konstrukcje 20 wieku, No.3, grudzień 2007, s. 23–26.
- [86] Zgórniak P., Grdulska A., Zagórski I.: *Sprawozdanie z badań procesu skrawania stopów magnezu*, badania prowadzono w ramach projektu POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka.
- [87] 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.
- [88] Zhou H., et al.: *Study of ignition proof AZ91D magnesium alloy chips with cerium addition*, "Journal of Rare Earth", Vol. 23, No. 4, August 2005, s. 466–469.
- [89] http://www.test-therm.com.pl/pdf/teoria_kamer_termowizyjnych.pdf, z dnia 18.02.2011
- [90] Maciejny A.: *Metale i stopy metaliczne oraz ich wpływ na rozwój inżynierii materiałowej w Polsce*, [http://fundacjarozwojunauki.pl/res/Tom2/2 - Maciejny.pdf](http://fundacjarozwojunauki.pl/res/Tom2/2_-_Maciejny.pdf), z dnia 8.11.2010
- [91] <http://www.ntp.com.pl/>, *Magnez – materiał o rewelacyjnych właściwościach*, z dnia 3.03.2010
- [92] Strazzi E., Ferrari Ch.: *Low energy consumption and environmental friend process formagnesium anodising*, <http://www.italfinish.com/public/-images/lowenergy1.pdf>, z dnia 9.04.2010
- [93] Skorupa R., Mikołajek D.: *Gaszenie pożarów cieczy łatwopalnych i innych substancji*, Ogólnopolskie Seminarium Szkoleniowe „ADR w praktyce polskich przedsiębiorców", [http://www.malopolskie.pl/Pliki/2006/8 - skorupa.pdf](http://www.malopolskie.pl/Pliki/2006/8_-_skorupa.pdf), z dnia 29.01.2009
- [94] Bądkowski A.: *Karta charakterystyki niebezpiecznej substancji, Magnez - sproszkowany lub w kawałkach*, <http://www.am.wroc.pl/bhp.html>, z dnia 9.04.2010
- [95] <http://www.polmag.pl/>, z dnia 9.04.2010
- [96] Jemielniak K.: *Obróbka na sucho i z minimalnym smarowaniem*, Seminarium Naukowe Instytutu Technologii Maszyn, http://www.cim.pw.edu.pl/itm/pdf/pre_20051020.pdf, z dnia 9.04.2010
- [97] www.magnesium-technologies.com, z dnia 11.04.2010
- [98] Yap K.: *How To Machine Magnesium?* <http://www.suwaprecision.com/>, z dnia 6.10.2010
- [99] *Magnesium alloys encyclopedia*, <http://www.magnesium.com/>, z dnia 26.10.2012
- [100] Lopez de Lacalle L. N.: *High Performance Machining*, http://www.scitopics.com/High_Performance_Machining.html#, z dnia 30.09.2010
- [101] *Machining of magnesium*, <http://www.magnesium-elektron.com>, z dnia 21.09.2010

- [102] Leigh E., Tlustý J., Schueller J.: *Applying high-speed machining techniques on rotor grip configurations*, Presented at the American Helicopter Society 55th Annual Forum, Montréal, Quebec, Canada, May 25–27, 1999, s.1–16, http://www.mfg-labs.com/FileDownload/Papers_Presentations/Paper/-/HSM/of/Aluminum/Clevis/Conf/Leigh.PDF, z dnia 7.01.2011
- [103] <http://www.kfap.pl/>, z dnia 19.12.2010
- [104] Machining magnesium, http://www.nanomag.us/Hydro_Mg_Brochure_Machining_Mg.pdf, z dnia 19.01.2012
- [105] <http://www.intlmag.org/>, z dnia 6.11.2012
- [106] <http://www.wskrz.com/>, z dnia 22.04.2012
- [107] <http://www.czaki.pl/>, z dnia 9.04.2010
- [108] Chłopik A.: *Pomiary z wykorzystaniem termopar bez tajemnic*, <http://automatykab2b.pl/technika/139-pomiary-z-wykorzystaniem-termopar-bez-tajemnic>, z dnia 9.03.2007
- [109] Minkina W.: *Pomiary temperatury*, <http://el.pcz.czyst.pl/~za/stud/term/lab.html>, z dnia 16.10.2010
- [110] <http://www.statsoft.pl/>, z dnia 23.11.2012
- [111] http://www.statsoft.pl/czytelnia/artykuly/Wspomaganie_stat_analizy_wynikow.pdf, z dnia 26.11.2013
- [112] http://www.110.pl/czytelnia/artykuly/Eksploracja_danych.pdf, z dnia 26.11.2013
- [113] <http://www.keronite.com/>, z dnia 10.12.2012
- [114] <http://www.sandvik.coromant.com/>, Katalog Sandvik, *Poradnik obróbki skrawaniem: Frezowanie*, z dnia 15.03.2011
- [115] <http://www.cantonigroup.com/>, Katalog Fenes, *Narzędzia z węgla spiekane Harndenmetal*, z dnia 27.12.2012
- [116] <http://www.guehring.pl/>, Katalog Guhring, *Narzędzia PKD/CBN*, z dnia 17.10.2012
- [117] <http://www.kistler.com/>, z dnia 14.03.2013
- [118] PN-EN 1753:2001: *Magnez i stopy magnezu – Gąski i odlewy ze stopów magnezu*.
- [119] PN-EN 1754:2002: *Magnez i stopy magnezu – Anody, gąski i odlewy z magnezu i stopów magnezu - System oznaczenia*.
- [120] PN-H-88051:1964: *Stopy magnezu do przeróbki plastycznej – Gatunki, Norma wycofana bez zastąpienia*.
- [121] PN-ISO 3685:1996: *Badanie trwałości noży tokarskich punktowych*.
- [122] PN-EN ISO 6507-1: *Metale – Pomiar twardości sposobem Vickersa – Cz. 1: Metoda badań*.
- [123] Stanchem” sp.j., *Świadectwo kontroli jakości: Stop magnezu AZ91HP*, z dnia 14.12.2009
- [124] Einsal East Sp z o.o., *Test report: AZ31B-F Extrusions*, z dnia 21.05.2012