

mgr inż. Olga Gziut, prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski, dr inż. Ireneusz Zagórski

Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin
e-mail: i.zagorski@pollub.pl

Analiza fragmentacji wiórów podczas frezowania stopu AZ91HP w aspekcie zmniejszenia ryzyka zapłonu

Słowa kluczowe: frezowanie na sucho, stopy magnezu, bezpieczeństwo, niezawodność, eksploatacja maszyn

Streszczenie: Stopy magnezu są wykorzystywane jako nowoczesne materiały konstrukcyjne na elementy maszyn wytwarzane m.in. na potrzeby przemysłu lotniczego czy motoryzacyjnego. Obróbka skrawaniem tych elementów wiąże się z ryzykiem niekontrolowanego zapłonu podczas wykonywania operacji obróbkowych oraz powstawaniem drobnoziarnistych frakcji wiórów powodujących przyspieszone zużycie węzłów kinematycznych maszyn technologicznych. Zaproponowanie oceny ryzyka związanego z wyborem zakresu, uznawanego za bezpieczny, parametrów technologicznych frezowania, wydaje się celowe ze względów eksploatacyjnych maszyn obróbkowych. W artykule przedstawiono wyniki badań fragmentacji wiórów, ich masy oraz wymiarów charakterystycznych wiórów. Istotnym wydaje się określenie (na podstawie wymienionych wskaźników) obszarów uznawanych za efektywne a zarazem bezpieczne z punktu widzenia eksploatacji maszyn obróbkowych. Do badań wytypowano często stosowany stop magnezu, z grupy odlewniczych, AZ91HP.

1. Wprowadzenie

Wzrastające zapotrzebowanie rynku na narzędzia, pojazdy czy urządzenia o coraz mniejszej masie przyczynia się do popularyzacji stopów magnezu, które mogą z powodzeniem stanowić alternatywę dla innych materiałów konstrukcyjnych. Z punktu widzenia obróbki skrawaniem stopy magnezu odznaczają się bardzo dobrą skrawalnością. Należy tutaj wymienić niski opór właściwy skrawania, niewielkie wartości sił skrawania oraz niskie temperatury w strefie skrawania. Stopy magnezu charakteryzują się także wysoką wytrzymałością, dobrymi właściwościami odlewniczymi, zdolnością tłumienia drgań, czy dobrym ekranowaniem promieniowania o źródle elektromagnetycznym [23]. Powyższe właściwości sprzyjają rozpowszechnianiu stopów magnezu w takich dziedzinach jak przemysł motoryzacyjny oraz budowa samolotów czy maszyn. Do wzrostu zastosowania stopów magnezu w różnych dziedzinach życia przyczynił się także postęp w zakresie technologii stopów i metod wytwarzania wyrobów magnezowych, między innymi intensyfikacja prac nad specjalnymi obrabiarkami, czy narzędziami.

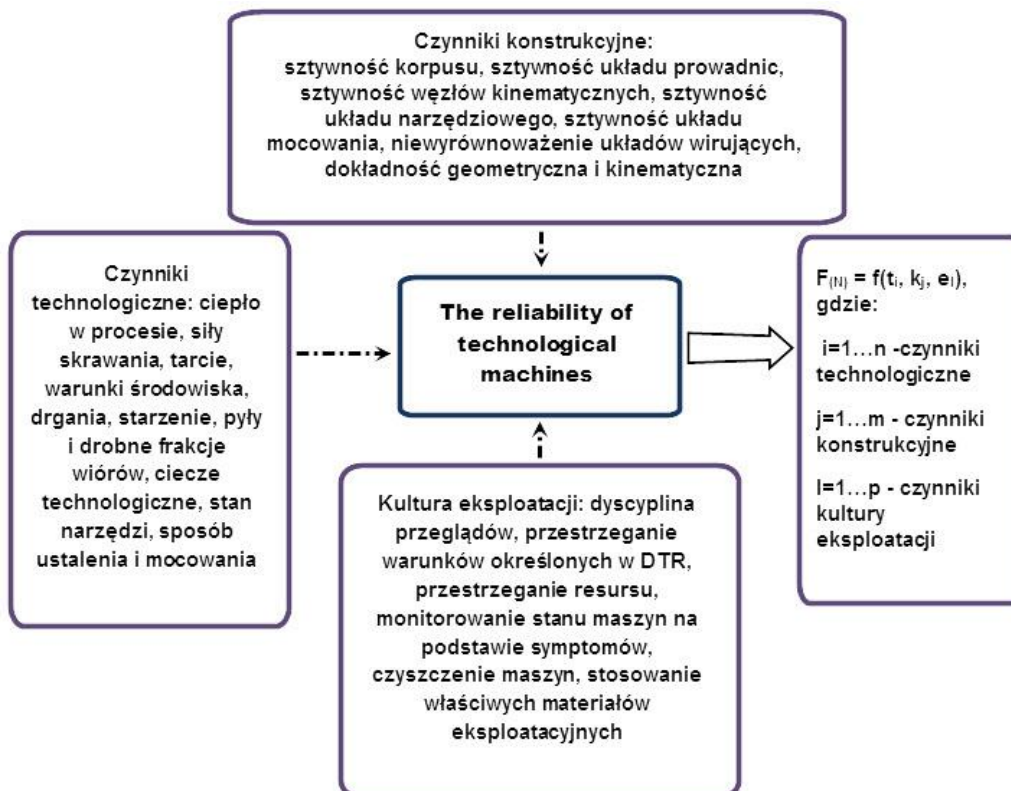
Przy założeniu, że eksploatacja to m.in. ogół zdarzeń i zjawisk jakim podlega dany obiekt techniczny (od procesu wytworzenia do likwidacji) możliwa jest próba określenia obszarów pracy określanych jako bezpieczne z punktu widzenia kryterium niezawodnej, bezawaryjnej eksploatacji. Ze względu na złożoność urządzeń obróbkowych powinno się w przypadku próby oceny niezawodności eksploatacyjnej posługiwać raczej pojęciem eksploatyki w ujęciu syntezy i analizy użyteczności, niezawodności i trwałości maszyn ze względu na optymalny osiągany efekt obróbki oraz użytkowanie maszyn i urządzeń zapewniające jak najdłuższe utrzymanie ich w ruchu. W przypadku opisu nowoczesnych

maszyn technologicznych (przypadki złożone) celowe wydaje się korzystanie z modeli posiadających strukturę szeregową, gdyż każdy element maszyny musi pozostać w stanie zdatności [13]. Również sposób utrzymania ruchu określonych urządzeń i maszyn zależy od ich charakterystyki konstrukcyjnej i roli, jaką spełniają w procesie produkcyjnym. Strategię eksploatacyjną należy więc dostosować do konkretnych (rys. 1) urządzeń i maszyn oraz warunków ich eksploatacji [12].



Rys.1. Przykład struktury niezawodnościowej obiektu technicznego (maszyny technologicznej) w układzie szeregowym ($R_1 \div R_n$ – niezawodność wszystkich elementów szeregu) [13]

W naukach technicznych spotkać możemy odniesienie bezpieczeństwa tylko do człowieka (zagrożenie zdrowia lub życia), przy czym wszystkie sprawy ekonomiczne odnoszą się do niezawodności. Termin ten należałoby rozszerzyć o bezpieczeństwo eksploatacji maszyn obróbkowych. Bezpieczna eksploatacja to taka, która nie powoduje ryzyka uszkodzenia elementów maszyny obróbkowej ze względu na występujące zagrożenia. Dlatego też, przyjmuje się jako miarę bezpieczeństwa, tzw. ryzyko, ustalając prawdopodobieństwo wystąpienia w rozważanym systemie określonych strat w ustalonym przedziale czasu. Istnieje wiele metod określania ryzyka. W ocenie bezpieczeństwa można wykorzystać miary zagrożeń lub intensywność występowania uszkodzeń [18].



Rys.2. Czynniki wpływające na niezawodność w procesie eksploatacji maszyn technologicznych jako złożonego obiektu technicznego

Maszyna technologiczna jest złożonym obiektem technicznym. Jej niezawodność w procesie eksploatacji zależy od wielu czynników. Ważniejsze z nich przedstawiono na rys. 2. Jak można zauważyć „funkcja wyjścia” określona została przy pomocy trzech głównych grup czynników opisujących niezawodność maszyn technologicznych. Są to czynniki: technologiczne, konstrukcyjne oraz czynniki kultury eksploatacji.

W ostatnich latach optymalizacja procesu skrawania jest obiektem szczegółowych badań. Szczególną uwagę przykładą się do jakości obrabianej powierzchni [6, 20] i analizy warstwy wierzchniej [7, 8] produkowanych części maszyn.

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 wglębnego 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 efektywną eksploatacją obrabiarki, większą trwałością i niezawodnością narzędzi skrawających. Jednym z ważniejszych kryteriów decydujących o skuteczności prowadzenia procesu technologicznego jest czas maszynowy obróbki. Opierając się na takim kryterium, najlepszym narzędziem będzie takie, które może być eksploatowane z jak największą prędkością skrawania i posuwu, przy założonym okresie trwałości ostrza. Jedynym warunkiem zastosowania takiego narzędzia wydaje się być właściwa obrabiarka, która zapewni uzyskanie założonych parametrów skrawania [19]. Również uzyskane doświadczenia praktyczne wskazują, że w przypadku obróbki wysokokrzemowych stopów Al. (tzw. „siluminów”) istotna jest trwałość narzędzi, dotyczy to zwłaszcza obróbki zautomatyzowanej na centrach obróbkowych sterowanych numerycznie. Częsta wymiana narzędzi, ze względu na zużycie, może być w tych przypadkach przyczyną problemów związanych ze sterowaniem maszyną technologiczną jak i jakością obrabianych elementów. Zwiększone zużycie narzędzi, jakie występuje w trakcie obróbki tego rodzaju stopów, generuje większe siły skrawania co ma niekorzystny wpływ na warunki eksploatacji obrabiarek [9].

Jednym z największych zagrożeń powstających podczas obróbki stopów magnezu jest skłonność do samozapłonu, który może nastąpić w przypadku nagłego wzrostu temperatury, spowodowanego np. zużyciem ostrza, tworzeniem narostu. Temperatura zapłonu magnezu zawiera się w przedziale $480\div 645^{\circ}\text{C}$ [16, 17], po jej przekroczeniu najszybciej zapalają się pyły i wióry, paląc się jasnym płomieniem trudnym do ugaszenia. Powstawanie narostu na powierzchni przyłożenia lub natarcia ostrza, będącego następstwem intensyfikacji zjawiska adhezji, jest kolejnym problemem, który można jednak zredukować dobierając odpowiednio parametry obróbki oraz powłoki na narzędzia skrawające. Mała masa właściwa magnezu ($1,74\text{g/cm}^3$), z jednej strony jest jedną z jego największych zalet, z drugiej przyczynia się do powstawania tzw. pyłu magnezowego. Pył powstający podczas obróbki może negatywnie wpływać na zdrowie pracowników obsługujących maszynę. Dodatkowo drobne wióry i pył stanowią poważne utrudnienie w utrzymaniu maszyn w sprawności eksploatacyjnej. Mogą uszkodzić obrabiarkę dostając się w przestrzeń roboczą (prowadnice, łożyska), tym samym przyczyniając się do szybszego zużywania się maszyny. Dodatkowo zanieczyszczają przestrzeń roboczą obrabiarki, gdyż są trudne do usunięcia. Niedogodność może sprawiać także ich późniejsze magazynowanie, z którym wiążą się dodatkowe koszty.

Pomimo tych przeciwności zainteresowanie stopami magnezu nie słabnie, coraz więcej uwagi poświęca się optymalizacji produkcji wyrobów ze stopów magnezu pod kątem bezpieczeństwa i stabilności obróbki. Stopy Mg są nowoczesnym, innowacyjnym materiałem

konstrukcyjnym stosowanym m.in. w przemyśle lotniczym (oszczędności w kosztach eksploatacji). Elementy konstrukcyjne wytwarzane ze stopów Mg są interesującą alternatywą dla części z tworzyw polimerowych (utrudniony recykling) oraz stopów Al. (większa gęstość) [4, 17]. Podczas realizacji różnych procesów obróbkowych podejmowane są próby kontroli wiórów, w sposób umożliwiający uzyskiwanie wiórów, które nie są łatwo zapalne [2]. Ryzyko wystąpienia nadtopień lub przypaleń na powierzchniach bocznych wiórów, może wystąpić po przekroczeniu temperatury topnienia (dla Mg ok. 650°C) podczas obróbki. Do obserwacji nadtopień wykorzystuje się często skaningową mikroskopię elektronową SEM [3] bądź mikroskopię optyczną [10]. 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 [4].

Wióry można klasyfikować w oparciu o ich kształt, zgodnie z normą PN-ISO 3685:1996, która dotyczy operacji toczenia. Podział ten jednak 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. Kształt wiórów zależy również w dużym stopniu od geometrii narzędzia skrawającego, stanu odkształcenia i naprężenia, czyli tzw. mechanizmu dekohezji (rozdzielania) materiału w strefie tworzenia wióra [22].

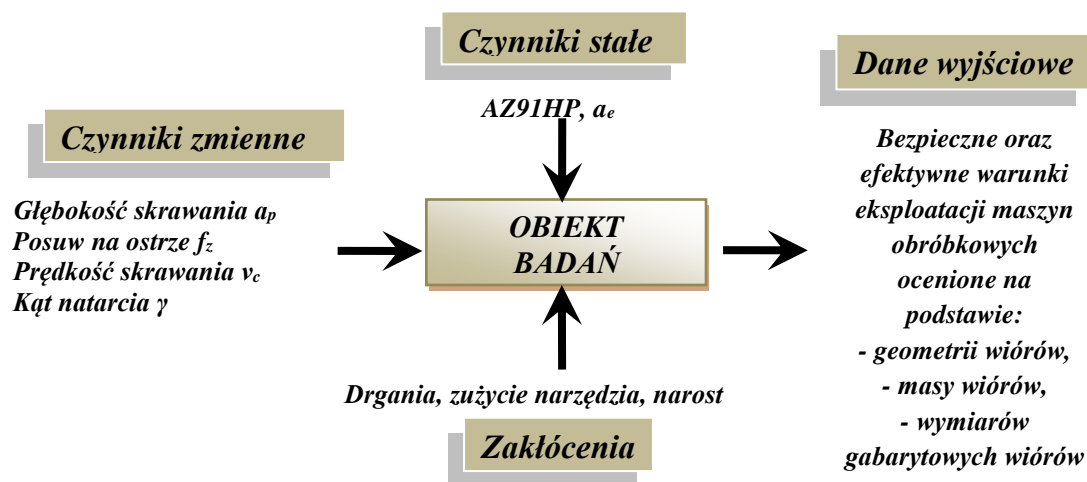
Podczas prac nad obróbką frezowaniem stopów Mg zauważono, że zarówno w zakresie obróbki konwencjonalnej jak i ze zwiększonymi prędkościami skrawania (z zastosowaniem powszechnie dostępnych narzędzi obróbkowych różnych producentów), największy wpływ na fragmentowanie wiórów oraz zwiększenie średniej masy jednostkowej wióra (w przypadku frakcji wiodącej) wykazuje posuw na ostrze f_z oraz głębokość skrawania a_p . Wzrost f_z oraz spadek a_p wpływają na zwiększenie liczby frakcji pośrednich wiórów, co jest niekorzystne ze względu na bezpieczeństwo obróbki. Również nadmierne zwiększanie prędkości skrawania v_c w zakresie obróbki szybkościowej HSM może wpływać na występowanie większej liczby frakcji pośrednich wiórów [10].

Dodatkowo podczas prac badawczych nad obróbką stopów magnezu, analizowany jest wpływ ciepła generowanego w strefie skrawania. W tym celu wykonywane są pomiary temperatury wiórów w strefie skrawania, średniej temperatury powierzchni przyłożenia narzędzia czy też temperatury mierzonej na styku narzędzia i przedmiotu obrabianego [3, 11]. Równie istotna staje się analiza zapłonu podczas obróbki z niewielkimi głębokościami skrawania oraz tzw. punkt zapłonu danego gatunku stopu Mg [5, 21]. Analiza zapłonu podczas obróbki związana jest z próbą określania tzw. nieodkształconej grubości wióra. Ze względów teoretycznych podejmowane są próby oszacowania tzw. nieodkształconej grubości wióra (*the undeformed chip thickness*) [14, 15]. Wzrost sił skrawania 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) [3]. Na rodzaj powstających wiórów (a więc i rodzaj zapłonu) mają m.in. wpływ prędkość skrawania, głębokość skrawania oraz gatunek (skład chemiczny) stopu magnezu. Zapłon wiórów staje się utrudniony, m.in. wraz ze wzrostem zawartości Al. [1].

2. Program i metodyka badań

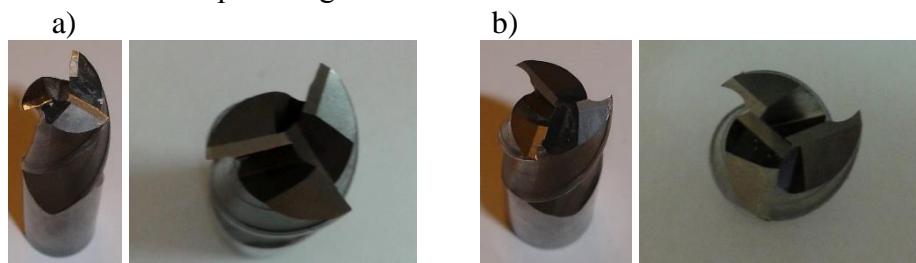
Na rysunku 3 przedstawiono plan badań przyjęty w pracy w zakresie analizy rozpatrywanych wskaźników. Pierwszym etapem analizy było zdefiniowanie geometrii wiórów, na podstawie której wykonano podział wiórów na poszczególne frakcje (stopień fragmentacji), w zależności od zmiany założonych parametrów. Następnie analizowano masę

jednostkową wiórów oraz wymiary gabarytowe. Jako czynniki zmienne przyjęto: głębokość skrawania a_p (0,5; 1,5; 3[mm]), posuw na ostrze f_z (0,05; 0,15; 0,3[mm/ostrze]), prędkość skrawania v_c (400; 800; 1200[m/min]) oraz kąt natarcia γ narzędzia (5° i 30°). Jako czynniki stałe przyjęto: szerokość frezowania $a_e=14$ mm oraz gatunek materiału, stop magnezu AZ91HP.



Rys.3. Plan badań w zakresie analizy geometrii, masy oraz wymiarów charakterystycznych wiórów w zależności od zmiany czynników zmiennych

W badaniach wykorzystano centrum frezarskie AVIA VMC 800HS. Jako narzędzia zastosowane zostały dwa frezy węglkowe 3-ostrzowe o różnej geometrii ostrza (rys. 4) dedykowane do obróbki stopów magnezu.



Rys.4. Frez węglkowy 3-ostrzowy o kącie natarcia: a) $\gamma = 5^\circ$, b) $\gamma = 30^\circ$

Podczas pomiarów długości, szerokości oraz pola uzyskanych w procesie frezowania wiórów użyto mikroskopu optycznego Nikon SMZ1500. Do określenia masy jednostkowej wiórów wykorzystano wagę laboratoryjną DV215CD o dokładność pomiaru 0,00001g. Analizowany proces był procesem ciągłym, dla każdego z wariantów, cechy geometryczne, masę oraz wymiary gabarytowe określone były na podstawie 5÷10 powtórzeń pomiarów.

Celem prowadzonych badań była obserwacja kształtu wiórów powstających w trakcie procesu frezowania stopu AZ91HP, określenie stopnia ich fragmentacji oraz masy jednostkowej wiórów. W przypadku stopów Mg określenie kształtu wiórów oraz obszarów występowania frakcji pylistej odgrywa jedną z kluczowych ról, w kontekście doboru parametrów technologicznych mających na celu minimalizację ryzyka związanego z obróbką tych stopów.

3. Wyniki badań oraz ich analiza

Badania przeprowadzono dla określonych parametrów technologicznych i każdorazowo po przejściu narzędzia zbierano wióry. Dla głębokości skrawania $a_p=0,5\text{mm}$, $a_p=1,5\text{mm}$ i $a_p=3\text{mm}$ zastosowano 5 przejść narzędzia. Następnie dla każdej zmiennej podzielono wióry na frakcje. O przyporządkowaniu do frakcji decydował kształt wióra oraz jego wielkość, i tak frakcja A oznacza wióry największe, a frakcja D najmniejsze. Dla frakcji A zaproponowano określenie „frakcji wiodącej”, pozostałe mniejsze frakcje wiórów określono jako „frakcje pośrednie”. Zmierzono także, wymiary wiórów przyporządkowanych do poszczególnych frakcji oraz określono stosunek szerokości do długości wybranych frakcji wiórów. Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki badań, dotyczące określania frakcji.

Tabela 1 Przykładowe frakcje wiórów ze stopu Mg AZ91HP w przypadku zmiany głębokości skrawania a_p : a) $a_p=0,5\text{mm}$, b) $a_p=1,5\text{mm}$, c) $a_p=3\text{mm}$, dla $v_c=800\text{m/min}$, $f_z=0,05\text{mm/ostre}$ i $\gamma=5^\circ$

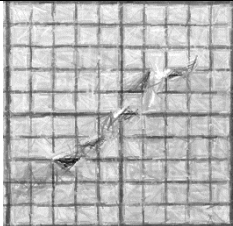
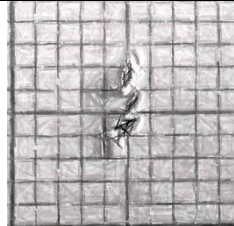
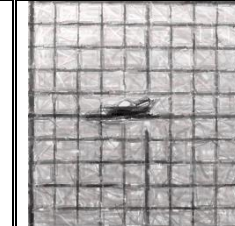
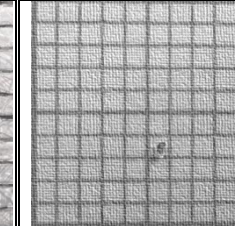
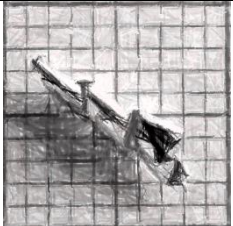
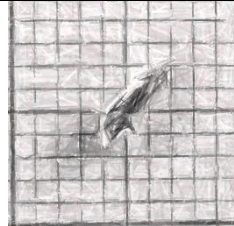
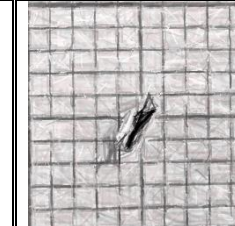
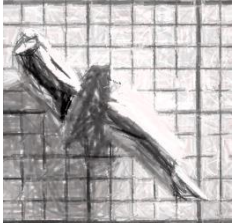
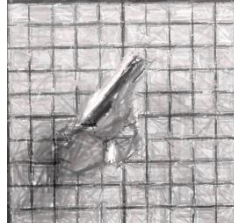
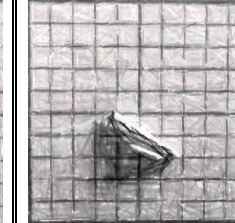
Frakcje Parametr	Frakcja wiodąca A	Frakcja pośrednia B	Frakcja pośrednia C	Frakcja pośrednia D
a) $a_p=0,5$ [mm]				
b) $a_p= 1,5$ [mm]				brak frakcji
c) $a_p= 3$ [mm]				brak frakcji

Tabela 1 pokazuje wpływ głębokości skrawania a_p na liczbę wyodrębnionych frakcji wiórów oraz ich kształt. Najwięcej frakcji wyodrębniono przy najmniejszej głębokości skrawania, co więcej dla tej głębokości frakcję D określono jako pył.

W celu opisu powstających podczas frezowania wiórów wprowadzono następujące pojęcia:

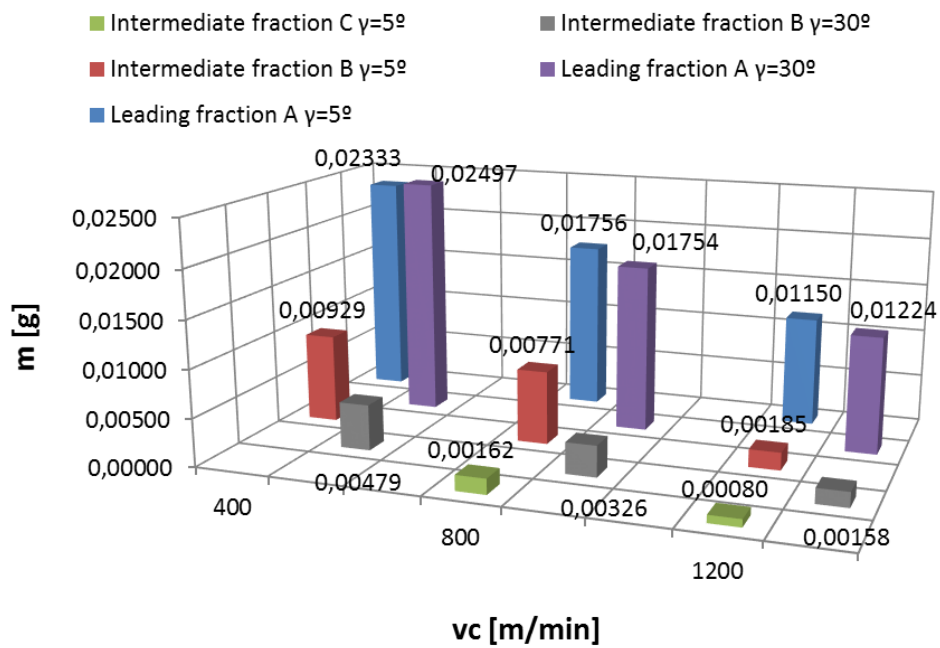
- *fractions* – populacja cząstek o określonej wielkości lub określonych wymiarach,
- *fragmentation* – zjawisko powstawania w trakcie obróbki, oprócz frakcji wiodącej (największej, charakterystycznej), frakcji o zróżnicowanym kształcie oraz masie wiórów.

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 bądź poprzedzającej.

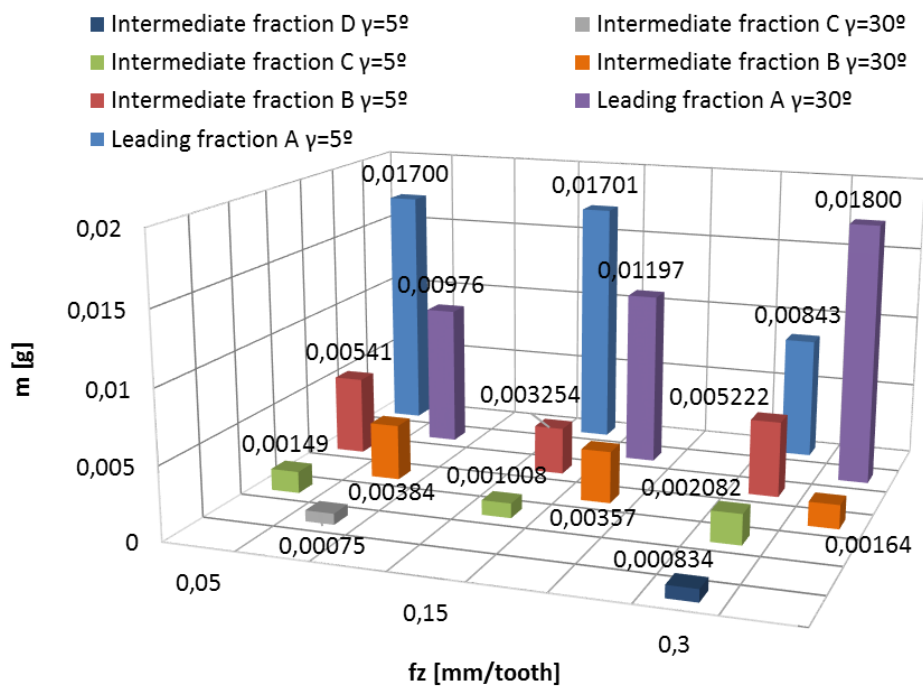
Na rys. 5 przedstawiono wpływ zmiany parametrów technologicznych frezowania na masę wiórów oraz powstawanie frakcji pośrednich. Zaprezentowano zmianę masy frakcji wiodącej oraz frakcji pośrednich wiórów. Wykresy te przedstawiono w celu lepszego

zobrazowania wpływu parametrów technologicznych frezowania na analizowane cechy wiórów.

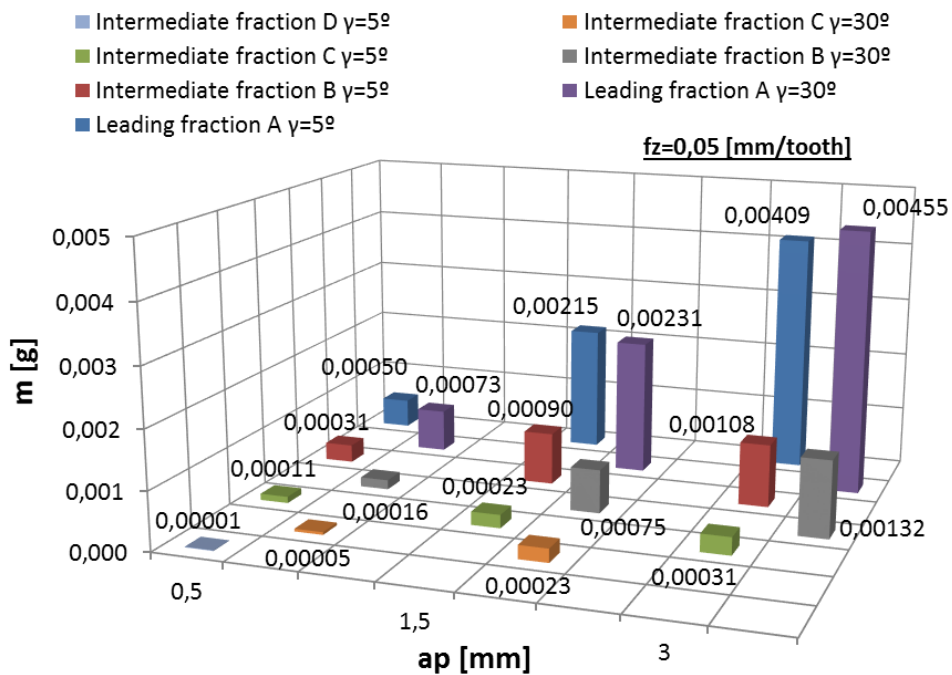
a)



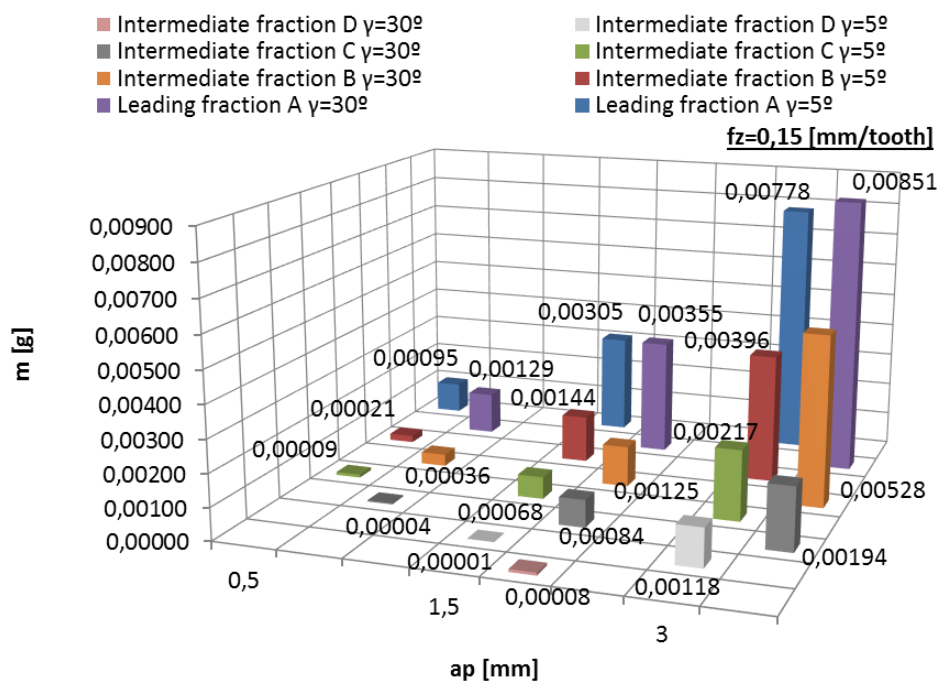
b)



c)



d)

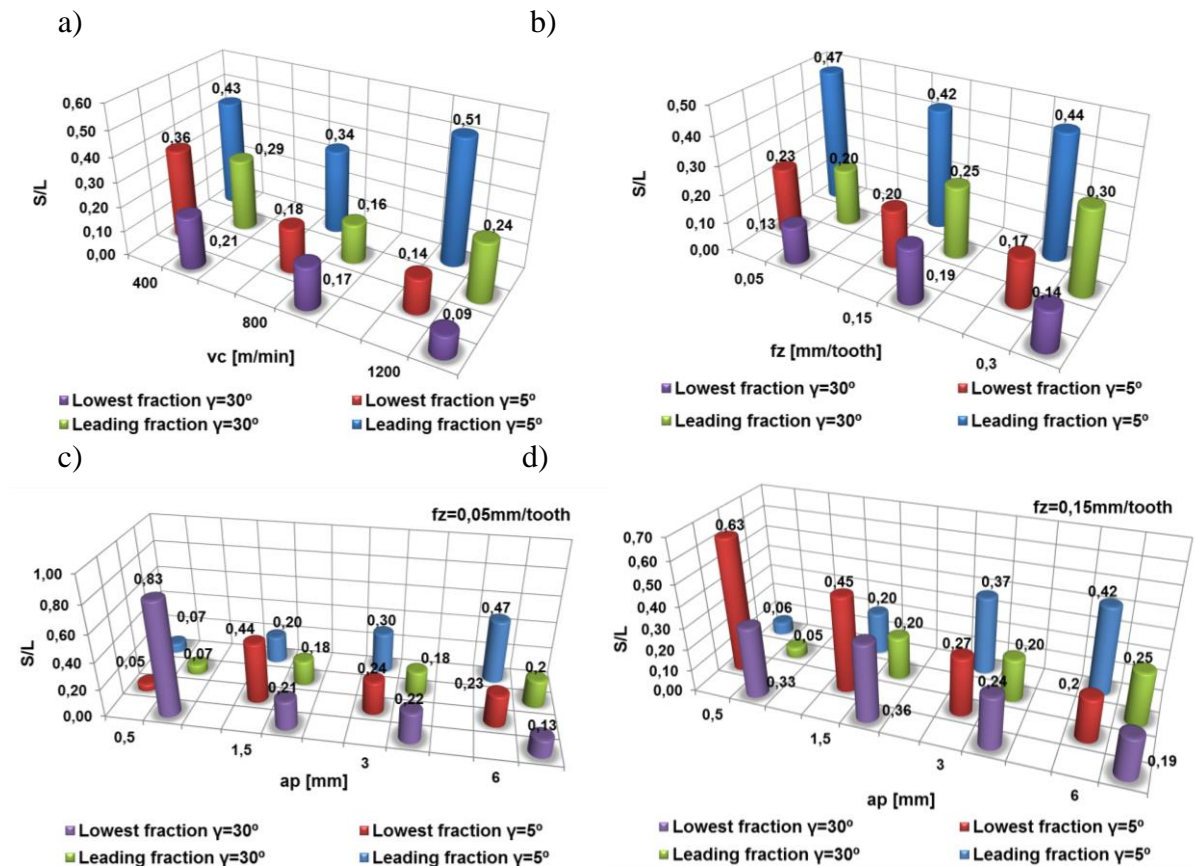


Rys. 5. Wpływ zmiany parametrów technologicznych oraz geometrii ostrza na masę wiórów występujących w poszczególnych frakcjach wyodrębnionych dla stopu Mg AZ91HP: a) v_c , b) f_z , c), d) a_p ($f_z=0,05\text{mm/ostre}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$)

Na podstawie danych przedstawionych na rys. 5a można stwierdzić, że największą masę posiadały wióry otrzymane dla prędkości skrawania 400m/min. Dla wszystkich wyodrębnionych frakcji widać stałą zależność, charakteryzującą się zmniejszaniem masy wraz ze zwiększaniem prędkości skrawania. Biorąc pod uwagę same frakcje wiodące można

zauważyć, że masy wiórów dla poszczególnych v_c były zbliżone, pomimo zastosowania innych narzędzi. Zgodnie z danymi przedstawionymi na rys.5b masy obu frakcji wiodących dla posuwu $f_z=0,05\text{mm/ostre}$ i $f_z=0,15\text{mm/ostre}$ są zbliżone. Widoczne różnice występują pomiędzy frakcjami wiodącymi przy posuwie $f_z=0,3\text{mm/ostre}$. Ma to związek z różną szerokością wiórów, wióry frakcji wiodących powstałe dla narzędzia o kącie natarcia $\gamma=30^\circ$, są o wiele węższe, niż te powstałe dla $\gamma=5^\circ$, co ma bezpośrednie przełożenie na ich masę. Na rysunkach 5c i 5d, gdzie parametrem zmiennym była głębokość skrawania, obserwuje się stopniowy wzrost masy wraz ze zwiększeniem głębokości oraz posuwu, co wydaje się być oczywiste, gdyż rośnie przekrój warstwy skrawanej. Na uwagę zasługują widoczne na rysunku 5c frakcje pośrednie D ($a_p=0,5\text{mm}$, $\gamma=5^\circ$) i C ($a_p=0,5\text{mm}$, $\gamma=30^\circ$) oraz widoczne na rys. 5d frakcje pośrednie C ($a_p=0,5\text{mm}$ i $\gamma=5^\circ$), C ($a_p=0,5\text{mm}$ i $\gamma=30^\circ$) oraz D ($a_p=1,5\text{mm}$ i $\gamma=5^\circ$), D ($a_p=1,5\text{mm}$ i $\gamma=30^\circ$). Wymienione wyżej frakcje określono jako pył. Ich masa nie przekroczyła $0,0001\text{g}$, a w przypadku frakcji D ($a_p=0,5\text{mm}$, $\gamma=5^\circ$, rys.5c) oraz D ($a_p=1,5\text{mm}$ i $\gamma=5^\circ$, rys.5d) była tak niewielka ($0,00001\text{g}$), że przysporzyła trudności w trakcie pomiaru, nawet na wadze z tak dużą dokładnością.

Rysunek 6 przedstawia stosunek szerokości mierzonych wiórów do ich długości, dla zmiennych wartości określonych parametrow technologicznych (v_c , f_z , a_p). Na rysunku przedstawiono frakcję największą (wiodącą A) oraz najmniejszą dla zadanych parametrów.

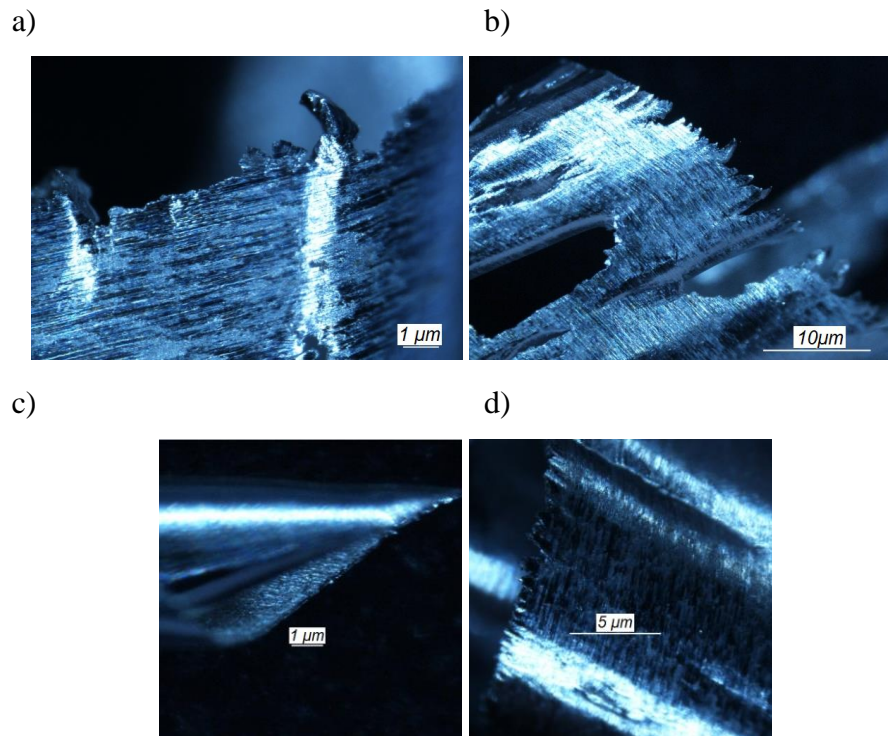


Rys. 6. Stosunek szerokości wiórów do ich długości w zależności od zmiany: a) prędkości skrawania v_c , b) posuwu na ostrze f_z , c) głębokości skrawania a_p ($f_z=0,05\text{mm/ostre}$), d) głębokości skrawania a_p ($f_z=0,15\text{mm/ostre}$)

Analizując rysunek 6, przedstawiający ilościową ocenę wiórów na podstawie stosunku ich szerokości do długości można zauważyć pewne ciekawe zależności. Obserwując wykres

(rys.6a), w którym czynnikiem zmiennym była prędkość skrawania widać, że wióry w frakcjach wiodących dla $\gamma=30^\circ$ były węższe, niż te dla $\gamma=5^\circ$. Stałą tendencją widać na przykładzie frakcji najmniejszych, które wraz ze zwiększeniem prędkości skrawania stawały się coraz bardziej zwinięte. Biorąc pod uwagę posuw na ostrze jako czynnik zmienny, możemy zauważyć, że stosunek szerokości do długości dla wiórów frakcji wiodącej $\gamma=5^\circ$ utrzymuje się na podobnym poziomie, natomiast dla $\gamma=30^\circ$ stopniowo wzrasta. Jego spadek następuje w przypadku frakcji najmniejszych dla $\gamma=5^\circ$. Wióry frakcji najmniejszej (dla $\gamma=30^\circ$) występujące przy $f_z=0,15\text{mm/ostre}$ są niewiele szersze, niż wióry frakcji najmniejszych występujących przy pozostałych posuwach ($f_z=0,05\text{mm/ostre}$ i $f_z=0,3\text{mm/ostre}$). Na kolejnym wykresie (rys.6c) zmieniano głębokość skrawania a_p przy $f_z=0,05\text{mm/ostre}$. Dla frakcji najmniejszych przy głębokości skrawania $a_p=0,5\text{mm}$ uzyskano dwa skrajne wyniki tzn. 0,05 dla $\gamma=5^\circ$ i 0,83 dla $\gamma=30^\circ$. Obie opisane powyżej frakcje oznaczono jako pył, tak znaczna różnica w wynikach ma związek z postacią wiórów zakwalifikowanych do tych frakcji. Wióry powstałe dla narzędzia o kącie $\gamma=5^\circ$ charakteryzowały się wysokim stosunkiem długości do grubości/szerokości, natomiast wióry dla $\gamma=30^\circ$ były drobnymi elementami o zbliżonej szerokości i długości. W przypadku, gdy $f_z=0,15\text{mm/ostre}$ (rys.6d) stosunek szerokości do długości dla frakcji największych wzrastał wraz ze zwiększeniem głębokości skrawania, zaś dla frakcji najmniejszych malał. Małe wartości otrzymane dla frakcji wiodących przy $a_p=0,5\text{mm}$ (0,06 dla $\gamma=5^\circ$ i 0,05 dla $\gamma=30^\circ$), miały związek z szerokością mierzonych wiórów, która w stosunku do ich długości była bardzo mała. Wraz ze zwiększeniem głębokości rosła szerokość wiórów, zmniejszając dysproporcje w ich wymiarach.

Na rys. 7 przedstawiono analizę nadtopień wiórów powstałych podczas frezowania stopu magnezu AZ91HP.

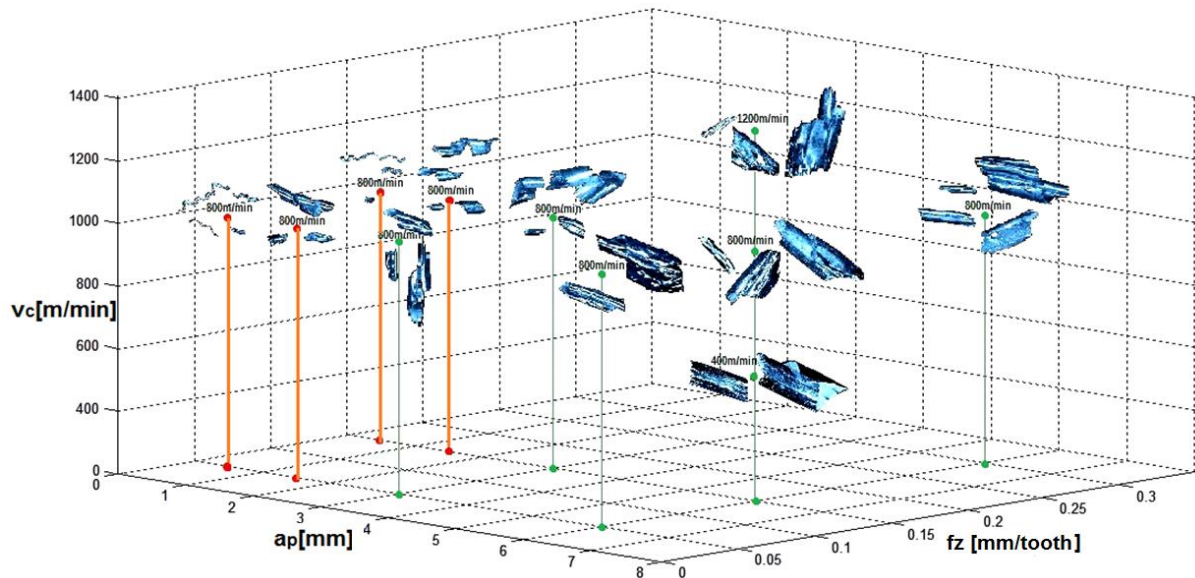


Rys. 7. Analiza nadtopień wiórów powstałych podczas frezowania stopu magnezu AZ91HP frezem o kącie natarcia: a) $\gamma=5^\circ$ ($v_c=1200\text{m/min}$, frakcja B), b) $\gamma=5^\circ$ ($f_z=0,3\text{mm/ostre}$, frakcja C), c) $\gamma=30^\circ$ ($v_c=1200\text{m/min}$, frakcja A), d) $\gamma=30^\circ$ ($f_z=0,3\text{mm/ostre}$, frakcja B)

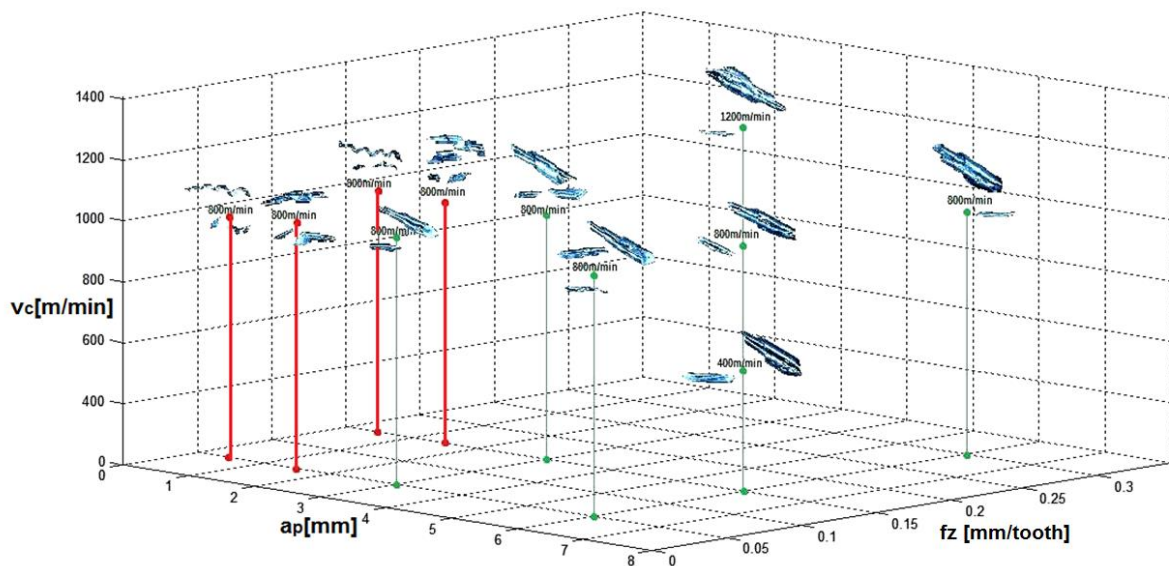
Na rysunku 7 przedstawiono fotografie wiórów wyodrębnionych dla największych wartości prędkości skrawania oraz posuwu na ostrze. Krawędzie wiórów powstających przy

frezowaniu frezem o kącie natarcia $\gamma=30^\circ$ są mniej postrzępione, niż w przypadku obróbki frezem o kącie $\gamma=5^\circ$. Nie mniej jednak, na żadnej z powyższych fotografii, nie obserwuje się charakterystycznych nadtopień, jakie występują w temperaturze zbliżonej do temperatury zapłonu, dlatego można wnioskować, że temperatura w strefie formowania się wióra była znacznie niższa od temperatury zapłonu. Oznacza to, że nawet w warunkach HSC maszyny mogą być bezpiecznie eksploatowane w warunkach obróbki na sucho.

Rysunki 8 i 9 stanowią pewnego rodzaju podsumowanie wyników badań dotyczących stopnia fragmentacji wiórów powstających przy obróbce stopu magnezu AZ91HP. Kolorem czerwonym zaznaczono obszary niebezpieczne ze względu na powstawanie frakcji pylistej.



Rys.8. Stopień fragmentacji wiórów powstałych w zależności od zmiany parametrów technologicznych (v_c , f_z , a_p) dla narzędzia o kącie natarcia $\gamma=5^\circ$



Rys.9. Stopień fragmentacji wiórów powstałych w zależności od zmiany parametrów technologicznych (v_c , f_z , a_p) dla narzędzia o kącie natarcia $\gamma=30^\circ$

Zarówno na rys. 8 jak i na rys. 9 obszarami niebezpiecznymi były najmniejsze zastosowane głębokości: $a_p=0,5\text{mm}$ jak i $a_p=1,5\text{mm}$. To właśnie przy tych parametrach powstawało najwięcej frakcji pylistej. Zmiennymi czynnikami, przy których stopień

fragmentacji był najmniejszy były prędkość skrawania oraz posuw na ostrze, przy czym zastosowanie narzędzia o kącie natarcia $\gamma=30^\circ$ sprzyjało powstawaniu mniejszej ilości frakcji.

4. Podsumowanie oraz wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników dotyczących stopnia fragmentacji można zauważyć, że mniejsza liczba wydzielonych frakcji, a więc i mniejszy stopień fragmentacji wiórów wystąpił dla narzędzia o kącie natarcia $\gamma=30^\circ$. Ponadto najwięcej frakcji wiórów wydzielono przy zmianie głębokości skrawania a_p , natomiast najmniej frakcji wydzielono przy zmianie prędkości skrawania v_c . Jeżeli chodzi o wymiary wiórów, długości wszystkich frakcji wiodących przy zmianie określonych parametrów były podobne, większe różnice dało się zauważyć w przypadku ich szerokości. Szerokość wiórów frakcji wiodących powstałych dla narzędzia o kącie natarcia $\gamma=5^\circ$, była większa, niż wiórów powstałych dla $\gamma=30^\circ$, dla wszystkich zmiennych parametrów technologicznych (v_c , f_z , a_p).

Głównym celem badań było wyznaczenie obszarów, w przestrzeni zmiennych niezależnych niepożądanych ze względu na największe skupienie frakcji pylistej. Obszarami takimi są najmniejsze głębokości skrawania ($a_p=0,5\text{mm}$ oraz $a_p=1,5\text{mm}$). Analizując kształt uzyskanych wiórów można stwierdzić, że najkorzystniejsze wióry ze względu na możliwość usunięcia z przestrzeni obrabiarki oraz łatwość magazynowania, stanowiły wióry uzyskane dla głębokości skrawania $a_p=6\text{mm}$, posuwu na ostrze $f_z=0,15\text{mm/ostre}$ oraz prędkości skrawania $v_c=400$ i 800m/min .

Na podstawie przeprowadzonych badań możliwe jest sformułowanie następujących wniosków ogólnych, dotyczących frezowania stopu AZ91HP:

- z punktu widzenia eksploatacji maszyn obróbkowych możliwe jest stosowanie efektywnej (niezawodnej) oraz bezpiecznej (bezawaryjnej) obróbki frezowaniem na suchu stopów Mg,
- jako zalecane obszary obróbki należy wskazać te, w których nie występuje pył Mg,
- ze względów eksploatacyjnych należy unikać stosowania zarówno małych a_p jak i małych wartości kąta γ ,
- za warunki eksploatacji nie powodujące zagrożenia uszkodzenia maszyn technologicznym można przyjąć zakres parametrów technologicznych frezowania: $v_c=400\div 800\text{ m/min}$, $f_z=0,15\div 0,3\text{ mm/ostre}$ oraz $a_p\geq 1,5\text{mm}$.

Realizując proces obróbkowy w konkretnych warunkach można przyjąć, że możliwa jest zmiana, w pewnym zakresie czynników technologicznych. Należy także podkreślić, że bezpieczna i niezawodna eksploatacja maszyn technologicznych przy obróbce stopów Mg jest także silnie związane z ogólną kulturą eksploatacji maszyn obróbkowych.

Acknowledgement: Financial support of Structural Funds in the Operational Programme - Innovative Economy (IE OP) financed from the European Regional Development Fund, Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 is gratefully acknowledged.



References

1. Akyuz B. Machinability of magnesium and its alloys. TOJSAT: The Online Journal of Science and Technology 2011; 1(3): 31-38.
2. Arai M, Sato S, Ogawa M, Shikata H I. Chip Control in Finish Cutting of Magnesium Alloy. Journal of Materials Processing Technology 1996; 62: 341-344.

3. Fang F Z, Lee L C, Liu X D. Mean Flank Temperature Measurement in High Speed Dry Cutting. *Journal of Materials Processing Technology* 2005; 167: 119-123.
4. 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* 2010; 59: 151-154.
5. Hou J Z, Zhou W, Zhao N. Methods for Prevention of Ignition during Machining of Magnesium Alloys. *Key Engineering Materials* 2010; 447-448: 150-154.
6. Krolczyk G., Legutko S. Investigations Into Surface Integrity in the Turning Process of Duplex Stainless Steel. *Transactions of FAMENA* 2014; 38: 77-82.
7. Krolczyk G., Legutko S., Nieslony P., Gajek M. Study of the surface integrity microhardness of austenitic stainless steel after turning. *Tehnički Vjesnik – Technical Gazette* 2014; 21: 1307-1311.
8. Krolczyk G., Nieslony P., Legutko S., Stoic A. Microhardness changes gradient of the Duplex Stainless Steel (DSS) surface layer after dry turning. *Metalurgija* 2014; 53: 529-532.
9. Kuczmaszewski J, Pieśko P. Wear of milling cutters resulting from high silicon aluminium alloy cast AlSi21CuNi machining. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012; 16(1): 37-41.
10. Kuczmaszewski J, Zagórski I. Badania fragmentowania wiórów w procesie frezowania stopów magnezu. *Mechanik* 2014; 8-9: 321-328.
11. Le Coz G, Marinescu M, Devillez A, Dudzinski D, Velnom L. Measuring temperature of rotating cutting tools: Application to MQL drilling and dry milling of aerospace alloys. *Applied Thermal Engineering* 2012; 36: 434-441.
12. Legutko S. Development trends in machines operation maintenance. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2009; 2: 8-16.
13. Legutko S. *Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń*. Warszawa: Wyd. Szkolne i Pedagogiczne, 2007.
14. Li H Z, Liu K, Li X P. A new method for determining the undeformed chip thickness in milling. *Journal of Materials Processing Technology* 2001; 113(1-3): 378-384.
15. Lotfi Sai, Bouzid W, Zghal A. Chip thickness analysis for different tool motions for adaptive feed rate. *Journal of Materials Processing Technology* 2008; 204(1-3): 213-220.
16. Oczóś K E. Extension of the magnesium alloys application range. *Mechanik* 2009; 5-6: 386-400.

17. Oczóś K E, Kawalec A. Kształtowanie metali lekkich. Warszawa: PWN, 2012.
18. Oziemski S. Efektywność eksploatacji maszyn, Podstawy techniczno-ekonomiczne. Radom: Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji, 1999.
19. Semotiuk L. An analysis of the operational characteristics of innovative tool structures used in high speed rough milling processes. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2009; 1: 46-53.
20. Wojciechowski S., Twardowski P., Wieczorowski M. Surface texture analysis after ball end milling with various surface inclination of hardened steel. Metrology and Measurement Systems 2014; 21(1): 145-56.
21. 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.
22. POLSKA NORMA Badanie trwałości noży tokarskich punktowych. PN-ISO 3685:1996.
23. <http://www.polmag.pl/>, z dnia 20.03.2015r.