

EFEKTYWNOŚĆ WYTWARZANIA ELEMENTÓW LOTNICZYCH ZE STOPÓW ALUMINIUM I MAGNEZU

Józef KUCZMASZEWSKI

Streszczenie: W pracy analizowano warunki efektywnej obróbki skrawaniem stopów aluminium i stopów magnezu dla potrzeb przemysłu lotniczego. Wskazano na wymagania stawiane elementom konstrukcji lotniczych, nowe możliwości wynikające z stosowania nowoczesnych maszyn technologicznych i narzędzi oraz najistotniejsze ograniczenia. W części eksperymentalnej badano wpływ technologicznych parametrów obróbki na jej efekty w aspekcie dokładności geometrycznej i efektywności.

Słowa kluczowe: Stopy aluminium, stopy magnezu, dokładność, efektywność, obróbka HSM i HPC.

1. Wstęp

Obniżenie kosztów wytwarzania i eksploatacji statków powietrznych jest kluczowym elementem powodzenia na rynku usług lotniczych. Technikę i technologię wytwarzania elementów lotniczych determinują następujące, ważniejsze czynniki:

- wysoka niezawodność wytwarzanych elementów, zwłaszcza tzw. elementów krytycznych,
- lekkość konstrukcji, przy zachowaniu odpowiedniej wytrzymałości i sztywności,
- możliwie najmniejsza ilość elementów składowych poszczególnych zespołów, zmniejsza to ilość połączeń, zwiększa sztywność zespołów, zmniejsza koszt montażu, ułatwia serwisowanie,
- odpowiednie łączenie elementów, zapewniające szczelność konstrukcji.

Kadłub, elementy podwozia, korpusy przekładni i elementy nośne wykonywane są z kompozytów polimerowych oraz w znacznym stopniu ze stopów aluminium, stopów tytanu, stopów magnezu, w mniejszym stopniu ze stali, stopów niklu i in.

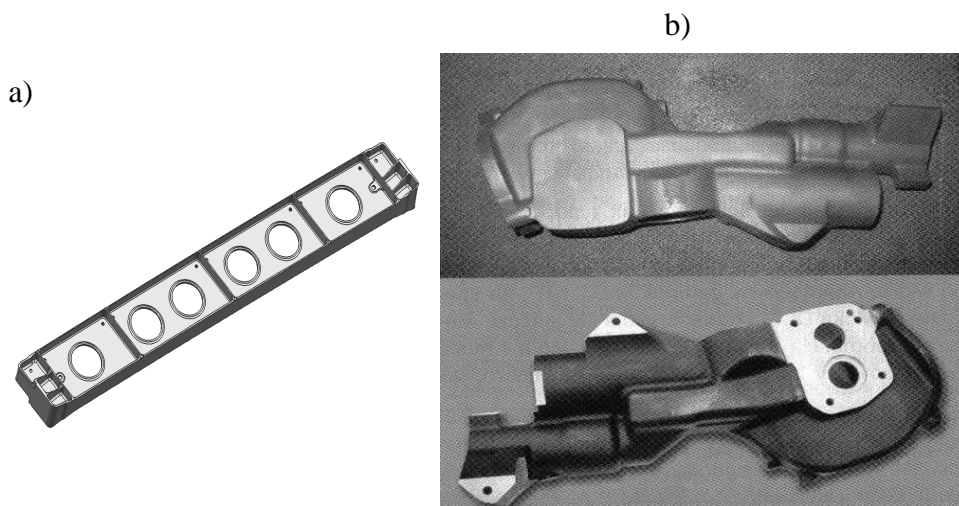
Charakterystyczną cechą nowoczesnych elementów dla lotnictwa, wykonywanych ze stopów lekkich jest ich jednolita konstrukcja, wykonywana z monobloków na nowoczesnych centrach obróbkowych sterowanych numerycznie. Zastępują one zespoły montowane wcześniej z kilkudziesięciu a nawet kilkuset elementów. Takie elementy jak wręgi czy podłużnice mają charakterystyczny kształt określany często w języku technologicznym jako konstrukcje „kieszeniowe”. Innym przykładem jest konstrukcja odlewana, najczęściej z odlewniczych stopów Al. lub Mg. Przykłady takich konstrukcji pokazano na rys. 1.

2. Właściwości stopów Al. i Mg

Stopy aluminium należą do najważniejszych materiałów konstrukcyjnych stosowanych w przemyśle lotniczym. Głównymi składnikami stopów Al stosowanych w lotnictwie są:

miedź, krzem, mangan, magnez i cynk. Rzadziej dodaje się nikiel, żelazo, tytan, chrom, beryl i inne.

Występują one jako stopy do przeróbki plastycznej oraz stopy odlewnicze. Gęstość czystego glinu wynosi $2,7 \text{ g/cm}^3$. Po poddaniu stopu przesycaniu, a następnie starzeniu (utwardzenie wydzieleniowe lub inaczej dyspersyjne), posiada on wysoką wytrzymałość mechaniczną: wytrzymałość doraźna wynosi ponad 400 MPa.



Rys. 1. Przykłady charakterystycznych konstrukcji ze stopów lekkich w przemyśle lotniczym: a) konstrukcja kieszeniowa o dużym stosunku długości do pozostałych dwóch wymiarów, b) obudowa pompy olejowej dla przemysłu lotniczego wykonana ze stopu Mg [6]

Ze stopów aluminium wykonuje się [16] bardzo obciążone elementy konstrukcji lotniczych, takie jak: dźwigary, uźebrowania, poszycia, łopatki kompresorów, tarcze wentylatorów pracujące w temperaturach $200 - 300^\circ\text{C}$, wsporniki konstrukcji płatów samolotów naddźwiękowych itp. Ze stopów Al odpornych na korozję wykonuje się spawane zbiorniki, przewody doprowadzające paliwo i olej, śmigła i bębny do kół. Ważne znaczenie mają stopy Al do produkcji nitów, ten sposób łączenia konstrukcji lotniczych, choć nie jest uważany za nowoczesny, jest nadal często stosowany.

Odlewnicze stopy aluminium mają gorsze właściwości mechaniczne w porównaniu ze stopami przerabianymi plastycznie. Do tej grupy należą siluminy, czyli stopy aluminium-krzem, zawierające 4-30% krzemu. Pod względem zawartości krzemu siluminy dzielimy na: podeutektyczne, eutektyczne i nadeutektyczne.

Magnez jest jednym z najlżejszych metali, o gęstości $\rho=1,74\text{g/cm}^3$, tj. o 35% mniej niż Al i blisko 5-krotnie mniej niż Fe. Czysty Mg, z powodu podatności na utlenianie, miękkości i niskiej wytrzymałości, jest rzadko stosowany w praktyce. W technice coraz większe zastosowanie mają stopy Mg, głównie z Al, Zn, Mn. Domieszki z reguły zwiększają masę właściwą Mg, wyjątek stanowi Lit, którego gęstość wynosi $\rho=0,535 \text{ g/cm}^3$ [3, 17]. Temperatura zapłonu wynosi ok. 480°C , temperatura spalania powyżej 2000°C .

Ogólnie stopy Mg dzieli się na odlewnicze i do przeróbki plastycznej. W obu tych grupach podstawowymi są podwójne stopy Mg-Mn oraz wieloskładnikowe stopy Mg-Al-Zn-Mn oraz Mg-Zn-Zr. Stopy te, mogą zawierać ponadto Ce (cer), Th (tor), La (lantan), Nd (neodym) i inne, a więc pierwiastki powodujące wyraźny wzrost właściwości mechanicznych w podwyższonych temperaturach [3, 17].

Stopy magnezu wykorzystywane są do wykonywania zarówno bardzo obciążonych elementów konstrukcji lotniczych, pracujących w temperaturze pokojowej, jak i części, które przenoszą nieduże obciążenia, np. zbiorniki, armatura olejowa i paliwowa, korpusy, pokrywy. Wytwarza się z nich również średnio obciążone elementy konstrukcji lotniczych jak poszycia samolotów i śmigłowców. Stopy Mg mogą być wykorzystywane do pracy w temp. od -190 do +150°C. W lotnictwie wykonuje się z nich także korpusy sprężarek i przyrządów, pokrywy korpusów przekładni i pomp olejowych, części kół lotniczych, drążki kierownicze, widełki kół ogonowych, kratownice, nadwozia, pedały sterowania itd.

3. Skrawalność stopów Al. i Mg

Szybkość usuwania materiału podczas skrawania jest jednym z kluczowych czynników określających wydajność obróbki typowych części stosowanych w przemyśle lotniczym.

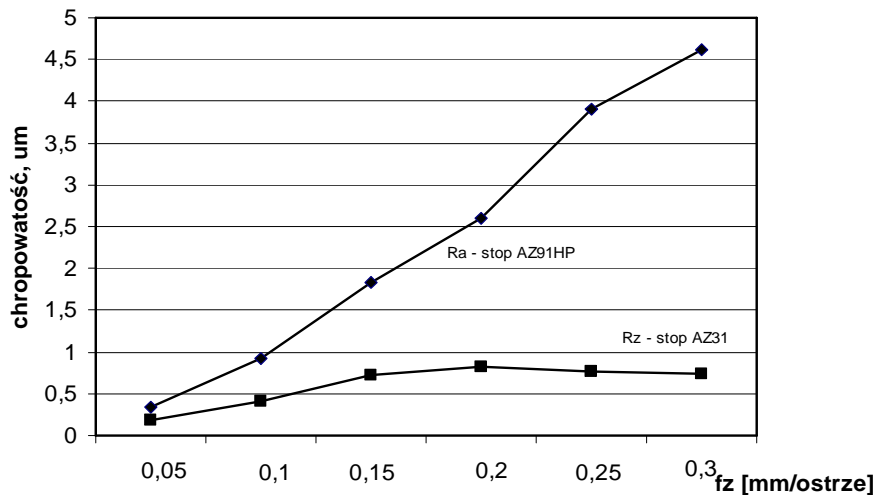
Stopy magnezu (z manganem, aluminium, cynkiem) są najlepiej skrawalnymi metalami z punktu widzenia wszystkich kryteriów [1, 5-10]. Mają niewielką twardość, niską temperaturę topnienia, więc temperatury skrawania są niewielkie. Brak powinowactwa do stali powoduje niewielkie zużycie ostrza, pozwala to na obróbkę z bardzo wysokimi prędkościami skrawania nawet przy użyciu stali szybko tnących. Siły skrawania są znacznie niższe niż przy obróbce innych metali. Wióry są segmentowe i kruche. Najgorszą cechą magnezu jest jego łatwopalność, co szczególnie dotyczy drobnych wiórów [4, 10, 13].

Jako materiały na ostrza skrawające są wykorzystywane drobnoziarniste węgliki spiekane i polikrystaliczny diament [2, 3].

Jednym z głównych problemów przy obróbce stopów aluminium jest łamanie wiórów, które często są ciągłe, grube i wytrzymałe. Podczas toczenia, długie wióry owijają się wokół materiału obrabianego. Poprawę można uzyskać stosując odpowiednie kąty natarcia oraz, obecnie laserowo kształtowane zwijacze, łamacze wiórów oraz fazki z ujemnym kątem natarcia, które poprawiają efektywność procesu. Innym sposobem na poprawę skrawalności może być modyfikacja składu stopu przez dodanie różnych pierwiastków stopowych, które ułatwiają poślizgi w strefie ścinania i łamanie wióra. Temperatura skrawania jest stosunkowo niska ze względu na niską temperaturę topnienia Al. (659°C).

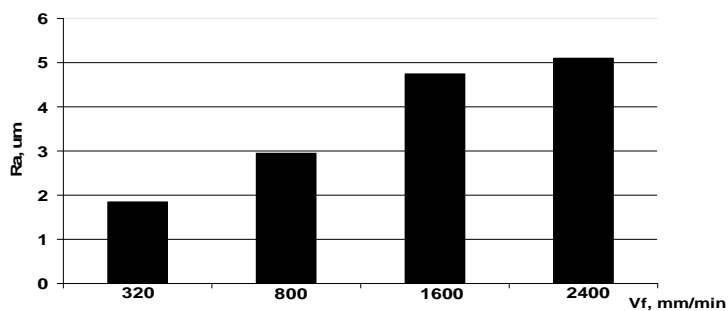
Twarde ziarna krzemowe w przypadku stopów aluminium zawierających powyżej 17%Si, powodują znaczne zużycie ostrza, dlatego celowe jest stosowanie do stopów aluminium i krzemu narzędzi diamentowych pozwalających na osiągnięcie prędkości skrawania 300÷1000m/min przy posuwie rzędu 0,125mm/obr [11, 12, 17].

Skrawalność stopów Al. w dużej mierze zależy od składu chemicznego stopu. Różnice można obserwować na przykładzie chropowatości powierzchni po obróbce. Na rys. 2 przedstawiono wpływ posuwu na chropowatość powierzchni dla stopu Mg do przeróbki plastycznej (AZ31) i stopu odlewniczego (AZ31HP). Z analizy wynika ważne spostrzeżenie, dla stopu AZ31 zmiana posuwu w dość szerokim zakresie nie zmienia istotnie chropowatości powierzchni. Można więc znacznie zwiększać intensywność obróbki bez większej „szkody” dla chropowatości powierzchni.



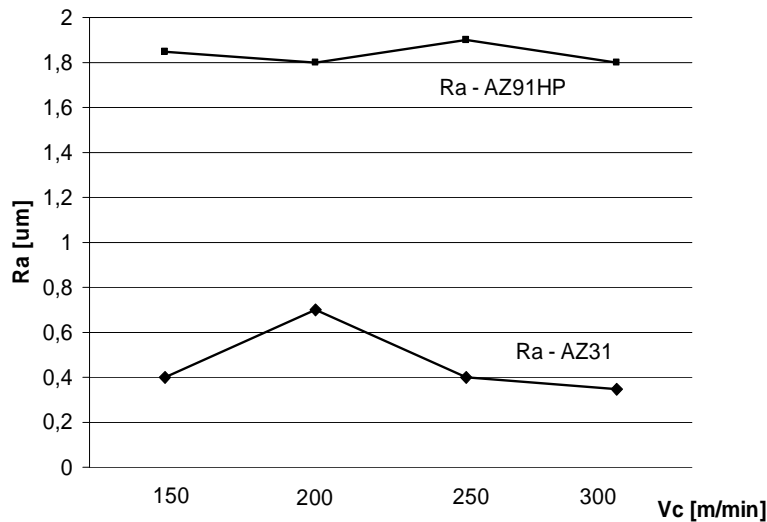
Rys. 2. Wpływ prędkości posuwu na chropowatość powierzchni po frezowaniu frezem trzpieniowym stopu AZ 91 HP i AZ31, $V_c = 200 \text{ m/min}$, $a_p = 6 \text{ mm}$, obróbka bez chłodziwa [18]

Na rys. 3 przedstawiono wpływ prędkości posuwu na wartość parametru Ra przy frezowaniu stopu Al.



Rys. 3. Wpływ prędkości posuwu v_f podczas obróbki skrawaniem stopu AlSi10Mg z użyciem chłodziwa na parametr chropowatości powierzchni Ra, $a_p = 6 \text{ mm}$, $v_c = 200 \text{ m/min}$

Jak można zauważyć, chropowatość powierzchni po obróbce stopu AlSi10Mg jest zbliżona do chropowatości stopu AZ91HP dla tych samych wartości posuwu. Stopy odlewnicze Al. wykazują się w tym względzie gorszymi wskaźnikami skrawalności w stosunku do stopów Al. przeznaczonych do przeróbki plastycznej. Na rys. 4 przedstawiono wpływ prędkości skrawania na wartość parametru Ra przy obróbce stopów magnezu.



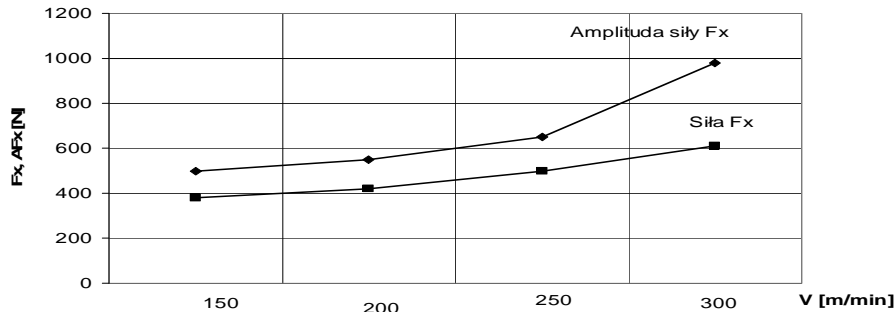
Rys. 4. Zależność prędkości skrawania V_c na wartość parametru chropowatości R_a , $a_p=6\text{mm}$, $f_z=0,15\text{mm/ostre}$

Z rys. 4 wynika, że zarówno dla stopu AZ31 jak i AZ91HP wzrost prędkości skrawania nie ma w zasadzie istotnego wpływu na zmianę chropowatości powierzchni. Jest to istotne z punktu widzenia efektywności obróbki tych stopów. Jest jednak wyraźna różnica w wartościach parametru R_a dla stopu Al. i Mg.

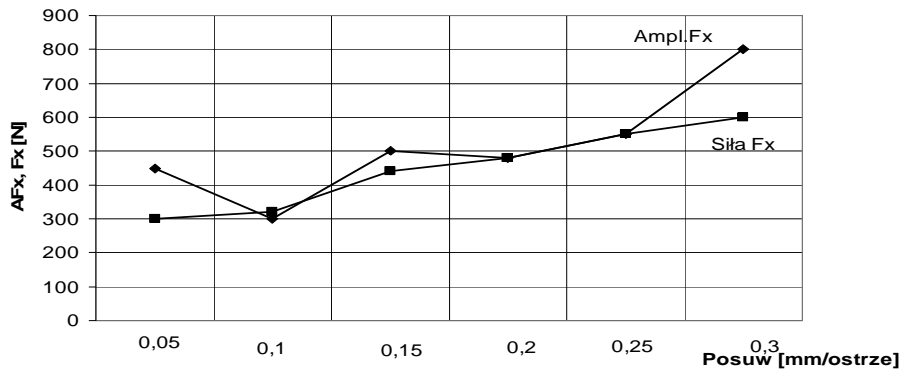
Analizując obecną literaturę można znaleźć wiele porad dotyczących poprawy efektywności skrawania stopów aluminium stosowanych w przemyśle lotniczym. Ogólnie można przytoczyć kilka podstawowych warunków [12, 15] zapewniających efektywną realizację zaawansowanej obróbki frezowaniem (HSC, HPC) stopów aluminium w aspekcie jej zastosowań w lotnictwie:

- stosowanie precyzyjnych oprawek narzędziowych, dobrze wyrównoważonych,
- stosowanie wysokiej jakości materiałów narzędziowych,
- używanie wyrównoważonych dynamicznie narzędzi,
- wybór najwłaściwszej strategii obróbki,
- stosowanie poprawnych sposobów ustalania i mocowania przedmiotów,
- wykorzystywanie narzędzi skrawających o odpowiednich cechach geometrycznych (łamacze, zwijacze, rozdrabniacze wiórów, odpowiednie kąty, odpowiednio ukształtowana i gładka powierzchnia natarcia),
- stosowanie odpowiedniej cieczy chłodziwo-smarującej oraz odpowiedniego jej podawania.

Ważną miarą skrawalności są opory skrawania i ich charakter. Istotne jest aby zmienność sił, charakteryzowana amplitudą tych sił, była jak najmniejsza. Na rys. 5 – 7 przedstawiono wpływ technologicznych parametrów obróbki na wartość i amplitudę składowej F_x siły skrawania.

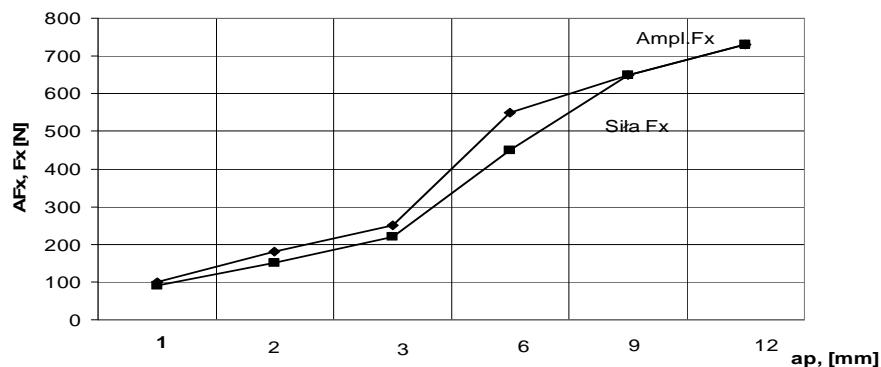


Rys. 5. Wpływ prędkości skrawania na wartość składowej siły skrawania F_x i jej amplitudę AF_x , $a_p = 6$ mm, $p_z = 0,15$ mm/ostrze, stop AZ91HP



Rys. 6. Wpływ wartości posuwu na wartość składowej siły skrawania F_x i jej amplitudę AF_x , $V_c = 200$ m/min, $a_p = 6$ mm, stop AZ91HP

Warto zauważyć, że zarówno wzrost prędkości skrawania (rys. 5) jak i ruchu posuwowego (rys. 6) nie zmieniają w sposób istotny wartości siły F_x , nie zmienia się także wyraźnie amplituda siły. Świadczy to o dobrej stabilności procesu z punktu widzenia jego dynamiki.



Rys. 7. Wpływ głębokości skrawania na wartość siły F_x i jej amplitudę, $V = 300$ [m/min], $f_z = 0,15$ [mm/ostrze], stop AZ91HP

Przedstawiona na rys. 7 zależność $F_x = f(AF_x, F_x)$ wskazuje na wzrost siły F_x , co jest oczekiwane, zaobserwować jednak można relatywny spadek amplitudy siły, co świadczy o możliwościach intensywnej obróbki przy pogarszającej się sztywności narzędzia bez pogorszenia stabilizacji procesu.

Tab.1. Ważniejsze czynniki i ich oddziaływanie na proces powstawania zadziorów

Lp	Rodzaj czynnika	Kierunek zmian	Intensywność tworzenia zadziorów
1	Gęstość	↓	↑
2	Plastyczność	↑	↑
3	Stępień ostrza	↑	↑
4	Głębokość skrawania	↑	↑
5	Posuw	↑	↑
6	Kąt natarcia	↑	↓
7	Ilość ostrzy	↑	↓
8	Gładkość rowków wiórowych	↑	↓

Jednym z istotnych wskaźników skrawalności jest skłonność materiału do tworzenia zadziorów. Zadziory to ostre pozostałości materiału częściowo oderwane od regularnej powierzchni. Najczęściej powstają podczas frezowania, wiercenia i cięcia. Mała gęstość i duża plastyczność sprzyjają powstawaniu zadziorów. W tworzeniu zadziorów dużą rolę odgrywają: deformacja boczna, gięcie wióra oraz siła rozciągająca pomiędzy materiałem i wiórem. W tab.1 przedstawiono najważniejsze czynniki i ich oddziaływanie na proces powstawania zadziorów.

Warto także nadmienić, że obróbka na sucho sprzyja powstawaniu zadziorów, natomiast chłodzenie i smarowanie tę intensywność zmniejszają. W obróbce Mg olej o dużej lepkości przylepia się do metalu i odcina dopływ tlenu, ma to ważne znaczenie ze względu na dużą skłonność magnezu do utleniania.

4. Półfabrykaty ze stopów Al i Mg

Właściwy dobór półfabrykatu istotnie wpływa na dalszy przebieg technologiczny, w tym także na efektywność obróbki. Obecnie konstruktorzy ze względów technologicznych odchodzą od konstruowania części wymagających obróbki cieplnej w trakcie procesu i szeroko stosują na półfabrykaty materiały obrobione cieplnie w płytach,

prętach, czy rurach, jeszcze w hutach. Jest to najkorzystniejsze rozwiązanie, ze względu na [1, 12]:

- wykonywanie obróbki cieplnej przez producenta materiału (doświadczenie),
- większą koncentrację operacji (nie ma konieczności podziału technologii na obróbkę zgrubną, obróbkę cieplną, obróbkę wykańczającą),
- wyeliminowanie ewentualnego prostowania części niesztynnych po obróbce cieplnej,
- znaczne skrócenie czasu procesu produkcyjnego, poprzez zmniejszenie kosztów transportu wewnątrzzakładowego,
- skrócenie czasu przygotowania produkcji,
- lepszą kontrolę nad procesem produkcji i jego jakością, ze względu na większą powtarzalność efektów obróbki mechanicznej w sytuacji wykonywania obróbki cieplnej na półfabrykacie.

Charakterystyczne jest to, że w zakresie obróbki stopów lekkich obserwuje się tendencję do upraszczania półfabrykatów kosztem zmniejszenia stopnia wykorzystania materiałów. Nie jest rzadkością proces technologiczny, w którym masa gotowego elementu nie przekracza 5% masy półfabrykatu.

5. Kierunki zwiększania efektywności produkcji w przemyśle lotniczym

5.1. Centra wieloosiowe

Obserwowana zmiana „filozofii” wysokowydajnego wytwarzania skutkuje intensywnym rozwojem maszyn technologicznych. Charakterystyczne jest zwłaszcza ich wyposażenie w napędy o dużych mocach i wysokoobrotowe wrzeciona.

Do skrawania stopów magnezu z zastosowaniem specjalnych cieczy chłodząco – smarujących mieszalnych z wodą (emulsji), można stosować standardowe centra obróbcze bez specjalnego, dodatkowego wyposażenia dotyczącego bezpieczeństwa pracy. Obrabiarki te powinny mieć możliwość skutecznego przewietrzania przestrzeni roboczej ze względu na możliwość koncentracji tworzącego się wodoru i pyłu magnezowego. Ich system chłodzenia powinien zapewniać duże wydatki cieczy chłodząco – smarującej w celu dobrego chłodzenia i wypłukiwania wiórów z obszaru obróbki. Przy skrawaniu z zastosowaniem cieczy chłodząco – smarujących niemieszalnych z wodą (olejów) obrabiarki powinny być wyposażone dodatkowo w skuteczne wyciągi przewietrzające przestrzeń roboczą i efektywny system odprowadzania wiórów ze strefy obróbki.

Parametry technologiczne obróbki stopów magnezu powinny uwzględniać skłonność wiórów do samozapłonu. Skłonność ta jest tym większa im mniejszy jest wiór. Zarówno głębokość skrawania jak i posuw nie powinny być zbyt małe.

Ekonomiczna obróbka stopów aluminium, z uwagi na bardzo duże ilości usuwanego materiału, stosunkowo niewielkie siły skrawania, wiąże się z zastosowaniem obrabiarek sterowanych numerycznie, z zamkniętą przestrzenią obróbczą, wyciągiem wiórów, charakteryzujących się dużą prędkością przesuwów szybkich (70 m/min) i roboczych (nawet do 20 m/min) i dużą szybkością obrotową wrzeciona (nawet do 60000 min⁻¹).

Do usuwania wiórów maszyny wyposaża się w osłony, urządzenia dostawne i trwale złączone z maszyną, przenośniki płytowe, ślimakowe, magnetyczne, systemy pneumatyczne, transport podpodłogowy, pochylnie wykorzystujące grawitację, palety

skrzyniowe, samowyladowcze, wózki jezdniowe, taczki, koleby dwukołowe, widłowe, dźwignice, ciągniki, suwnice.

5.2. Narzędzia i ich trwałość

Do obróbki stopów magnezu narzędzia powinny charakteryzować się „ostrą geometrią” (kąty natarcia $15 \div 25^\circ$), dużą przestrzenią rowków wiórowych, uniemożliwiającą gromadzenie się wiórów (2 lub 3 zęby), wypolerowanymi powierzchniami natarcia i pomocniczą powierzchnią przyłożenia, zapobiega to przyklejaniu się wiórów i ich lepsze usuwanie z przestrzeni międzyzębnej. Wskazane jest aby frezy do obróbki zgrubnej posiadały rowki do rozdzielania wiórów.

Przy obróbce z wysokimi prędkościami obrotowymi najlepiej jest stosować oprawki termokurczliwe. Takie mocowanie ma wiele zalet, przede wszystkim zapewnia lepsze wyrównowanie układu (brak śrub mocujących, tulei itp.), zwiększa sztywność układu, zapewnia lepszą współśrodkowość narzędzia i oprawki, lepszą stabilność obróbki poprzez zmniejszenie drgań, zwiększa trwałość narzędzi i in.

Obecnie obserwuje się tendencję do szerszego wykorzystywania do obróbki stopów aluminium i magnezu PKD (polikrystaliczny diament). Takie narzędzia w porównaniu do pełnowęglkowych są znacznie trwalsze i umożliwiają bardziej intensywną obróbkę. Pod względem zmian w konstrukcji narzędzi można również zauważyć tendencję do stosowania do obróbki głowic stanowiących monolit z oprawką.

Dla stopów Al. trwałość ostrza jest problemem tylko w obróbce wysokokrzemowych siluminów, gdzie oprócz krzemu rozpuszczonego występują ziarna krzemowe, mają one twardość powyżej 400 HV i intensyfikują zużycie narzędzia.

5.3. Obróbka z wysokimi prędkościami

Przyczyną problemów w procesie obróbki stopów aluminium jest skłonność do adhezji materiału obrabianego i narzędzia oraz w niektórych przypadkach niekorzystna postać wióra, zwłaszcza przy obróbce na sucho, co w rezultacie może doprowadzić do „zlepiania” przestrzeni międzyzębnej i zniszczenia narzędzia. Dotyczy to zwłaszcza obróbki stopów aluminium przeznaczonych do przeróbki plastycznej. Praktyka pokazuje, że nawet obfite chłodzenie nie zawsze zabezpiecza przed „zaklejeniem” rowków wiórowych. Najprostszym rozwiązaniem tego problemu jest zwiększenie właściwości smarnych cieczy chłodzącej – zwykle poprzez zwiększenie stężenia koncentratu, także stosowanie polerowanych powierzchni natarcia lub odpowiednich powłok na narzędziach skrawających.

Zwiększenie prędkości skrawania zdecydowanie poza obszar przewidziany dla obróbki konwencjonalnej jest aktualnie uznawane za główny kierunek wzrostu wydajności produkcji oraz poprawy jakości i dokładności części lotniczych. Wartości osiągalnych prędkości skrawania zależą od wielu czynników, a zwłaszcza od: rodzaju i gatunku obrabianego materiału, rodzaju i charakteru operacji, cech konstrukcji narzędzia, materiału narzędziowego, rodzaju pokrycia, sposobu chłodzenia i rodzaju cieczy technologicznej. Ograniczenia pochodzą również od obrabiarki: łożyskowania, napędu i sztywności wrzeciona, sztywności maszyny, wyrównowania zespołu oprawki i narzędzia, charakterystyki dynamicznej elementów ruchomych i układu sterowania CNC.

Podstawowa korzyść ze stosowania obróbki HSM to wysoka jakość powierzchni i redukcja czasu obróbki. Dodatkowe korzyści to ograniczenia tworzenia się zadziórów, lepsze odprowadzanie wióra, zwiększona stabilność procesu, uproszczone

oprzyrządowanie, małe siły skrawania (dzięki tej zalecie możliwa jest ekonomiczna obróbka części cienkościennych).

5.4. Szybkie prototypowanie

W procesie przygotowania produkcji ważną rolę odgrywa skrócenie czasu przygotowania poprawnej i sprawdzonej technologii. Termin „rapid prototyping” (szybkie wykonywanie prototypów) jest określeniem metod służących do szybkiej, precyzyjnej i powtarzalnej produkcji elementów polegającej na budowaniu przedmiotu warstwa po warstwie z określonego materiału. Przez długi okres najbardziej powszechną technologią tego typu była stereolitografia. Technika ta zapewniała wysoką precyzję i powtarzalność przy dobrej jakości powierzchni, oraz – w odróżnieniu od tańszej obróbki skrawaniem – możliwość utworzenia skomplikowanej struktury wewnętrznej elementu. Wadą jest koszt procesu (wysokie ceny urządzeń i substancji chemicznych), ograniczone rozmiary uzyskiwanych części, brak możliwości doboru materiału, z którego wykonany zostanie element (uzyskane w tym procesie tworzywo ma zwykle niską wytrzymałość mechaniczną i może wymagać ręcznej obróbki końcowej w celu uzyskania gładkich form). Do drukowania przestrzennego można w zasadzie zastosować każdy sproszkowany materiał. W praktyce jednak trudność stanowi spojenie proszku. Najczęściej stosowanym materiałem jest gips, ze względu na łatwość spojenia, niski koszt i dostępność. Zastosowanym spoiwem w jego przypadku jest woda. Oprócz gipsu, stosuje się także wosk, celulozę, a także ich mieszanki. Wyroby wykonane z tych materiałów charakteryzują się małą wytrzymałością. Innymi wykorzystywanymi materiałami są metale, polimery, ceramika oraz mieszanki tych materiałów. Szczególne znaczenie mają obecnie materiały światłoutwardzalne.

5.5. Rozwój technologii obróbki sucho i z minimalnym smarowaniem

Z uwagi na znaczny koszt recyklingu cieczy obróbkowej można zaobserwować intensywne poszukiwania możliwości skrawania stopów aluminium bez chłodzenia [14, 16]. Szacuje się, że łączne koszty dostawy, użycia i zbycia substancji chłodząco – smarujących stanowią kilkanaście procent kosztów produkcji. Jest to więcej niż koszty narzędziowe, które szacuje się na kilka procent. Ponadto udowodniono, że ciecze obróbkowe wykazują zdecydowanie negatywne oddziaływanie na zdrowie pracowników i stanowią poważne zagrożenie dla środowiska. W upowszechnianiu ekologicznego skrawania czyli skrawania na sucho, pierwszoplanową rolę przypisuje się powłokom narzędziowym. Jako czynniki chłodzące stosuje się azot, powietrze lub mgłą olejową.

Obróbka skrawaniem stopów aluminium na sucho z dużymi prędkościami jest mocno utrudniona. Obniżkę kosztów i mniejsze obciążenie środowiska zapewnia minimalne smarowanie stosowane zamiast konwencjonalnego chłodzenia (w miejsce emulsji olejowo–wodnej w ilości 20 do 40 l/h stosuje się smarowanie narzędzia mgłą olejową w ilości 20 ml/h). Mieszanina olejowo – powietrzna w mniejszym stopniu służy do chłodzenia, ułatwia natomiast odprowadzanie wiórów.

Ciecze do obróbki stopów Al. to emulsje wodno-olejowe lub oleje. Przy obróbce stopów AL. należy uwzględnić duży współczynnik rozszerzalności liniowej, mały relatywnie współczynnik sprężystości podłużnej E, dużą przewodność cieplną. Wydajność podawania cieczy powinna być uzależniona od masy obrabianego przedmiotu, czasu obróbki i zastosowanych parametrów.

6. Podsumowanie i wnioski

Przemysł lotniczy zawsze był promotorem kultury technicznej. Wynika to z wysokich wymagań jakie stawiane są elementom na statki powietrzne, wysokiej dyscyplinie technologicznej w procesie produkcji, różnorodnym materiałom, często trudnoobrabialnym i in.

Efektywność wytwarzania elementów lotniczych, przy zapewnieniu ich wysokiej niezawodności zależy od wielu czynników, ważniejsze z nich są następujące:

- odpowiednia technologiczność konstrukcji,
- odpowiednia strategia wytwarzania,
- sztywność OUPN,
- zwiększanie seryjności poprzez grupowanie elementów technologicznie podobnych,
- stosowanie narzędzi o podwyższonej trwałości,
- stosowanie intensywnych parametrów technologicznych obróbki przy zapewnieniu jej dobrej stabilności,
- skracanie czasu przygotowania konstrukcyjnego, technologicznego i organizacyjnego,
- odpowiednie nadzorowanie procesu i szybka, efektywna reakcja na utratę jego zdolności,
- stosowanie dobrej jakości półfabrykatów,
- stosowanie odpowiednich obrabiarek umożliwiających obróbkę HSM i HPC.

W obszarze czasu przygotowawczo-zakończeniowego, pomocniczego i obsługi jest największą rezerwą w zakresie poprawy efektywności wytwarzania. Efektywne wykorzystanie czasu pracy maszyny wymaga nie tylko strategii HSM czy HPC ale również minimalizowania czasu mocowania i odmocowywania przedmiotów, czasu pomiarów, ustawiania narzędzi, wymiany narzędzi, ograniczania do minimum czynności sterowania z poziomu maszyny i in. Ważne jest szybkie programowanie maszyn, minimalizowanie czasu związanego z uzbrajaniem maszyny, efektywne i szybkie szkolenie operatora.

Literatura

1. Adamski W.: Wybrane kierunki zwiększania wydajności skrawania. *Mechanik*, nr 5-6/2009.
2. Arai M., Sato S., Ogawa M., Shikata H.: Chip control in finish cutting of magnesium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 62 (1996) 341-344.
3. Bylica A.: *Materiałoznawstwo lotnicze*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Rzeszowskiej im. I Łukaszczyka. Rzeszów, 1980.
4. Fang F., Lee L., Liu X.: Mean flank temperature measurement in high speed dry cutting of magnesium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 167 (2005) 119–123.
5. Jemieliński K.: *Obróbka skrawaniem*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 2004.
6. Langner R.: *Materiały i cechy geometryczne narzędzi stosowanych do obróbki skrawaniem stopów lotniczych*. Raport 2009, POIG. 01.01.02-00-015/08-00.
7. Lahres M., Müller-Hummel P., Derfel O.: Applicability of different hard coatings in dry milling aluminium alloys. *Surface and Coatings Technology*, 91(1997), 116-121.

8. Mabrouki T., Girardin F., Asad M., Rigal J.: Numerical and experimental study of dry cutting for an aeronautic aluminium alloy (A2024-T351). *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48 (2008) 1187– 1197.
9. Tarek M., Girardin F., Asad M., Rogal J.F.: Numerical and experimental study of dry cutting for an aeronautic aluminium alloy (A2024-T351). *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48 (2008), p. 1187– 1197.
10. Miernik M.: Skrawalność metali. Metody określania i prognozowanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2000.
11. Nouari M, List G., Girot F., Gehin D.: Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45 (2005), 1436–1442.
12. Oczóś K.E.: Doskonalenie procesów kształtowania ubytkowego stopów aluminium. *Cz. I. Mechanik*, nr 3/2009.
13. Oczóś K.E.: Efektywne skrawanie stopów magnezu. *Mechanik*, nr 7/2000, s. 467–474.
14. Oczóś K.E.: Doskonalenie procesów kształtowania ubytkowego stopów aluminium. *Mechanik*, nr 4/2009.
15. Piekarski R.: Obróbka szybkościowa stopów aluminium (MITSUBISHI MATERIALS). *Mechanik*, nr 3/2008, s. 184.
16. Sieniawski J.: Stopy aluminium stosowane w technice lotniczej. *Mechanik* 7/2009, 649–654.
17. Roy P., Sarangi S.K., Ghosh A., Chattopadhyay A.K.: Machinability study of pure aluminium and Al–12% Si alloys against uncoated and coated carbide inserts. *Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 27 (2009) 535–544.
18. Zagórski I., Kuczmaszewski J.: Badania porównawcze skrawalności stopów magnezu AZ91HP i AZ31. Obróbka skrawaniem. Współczesne problemy. Red. Bogdan Kruszyński. Politechnika Łódzka. Wydział Mechaniczny, 2010.

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.0101.02-00-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

Prof. dr hab. inż. Józef KUCZMASZEWSKI
 Politechnika Lubelska
 Tel. 601801220, (81)5384235/ fax(81)5250808
 e-mail: j.kuczmaszewski@pollub.pl