

ZASTOSOWANIE STOPÓW MAGNEZU W LOTNICTWIE

BARTOSZ JANIK
Instytut Lotnictwa

Streszczenie

Stopy magnezu już od pierwszej połowy XX wieku zaczęły być stosowane w przemyśle lotniczym. Jednak wówczas borykano się z wieloma problemami, z których główne to zdolność do powstawania korozji oraz zagrożenie pożarem. Założeniem publikacji było sprawdzenie, czy stopy magnezu w dzisiejszych czasach są już na tyle rozwinięte, by mogły z powodzeniem konkurować z innymi materiałami stosowanymi w lotnictwie. Analiza została przeprowadzona na podstawie wykonanych obliczeń, a także bazując na różnych źródłach opisanych w pracy. Część artykułu została poświęcona opisowi zastosowania stopów magnezu w dzisiejszym przemyśle, co może być dobrym wyznacznikiem ich przydatności.

WSTĘP

Magnez jest zaliczany do najlżejszych metali, dlatego też jego zastosowanie w technice może być bardzo opłacalne. Niestety, jak napisano w [5], bardzo łatwo ulega korozji atmosferycznej ze względu na swój zasadowy charakter. Warstwy tlenków na magnezie, które wytwarzane są drogą utleniania chemicznego i które zabezpieczają materiał przed korozją atmosferyczną, posiadają niższą odporność w porównaniu np. z aluminium. W związku z tym konieczne jest nakładanie trwałych powłok ochronnych. Magnez techniczny ze względu na swoje słabe właściwości mechaniczne nie ma zastosowania jako materiał konstrukcyjny.

Zupełnie inaczej prezentuje się sytuacja w przypadku stopów magnezu, które cechują się znacznie lepszymi właściwościami, m.in. większą wytrzymałością. Ogromną zaletą wspomnianych stopów jest ich gęstość, która wynosi zaledwie około $1,80 \text{ g/cm}^3$, podczas gdy dla stopów aluminium, które uznawane są za lekkie, wynosi ona około $2,80 \text{ g/cm}^3$, zaś dla stali węglowej aż około $7,80 \text{ g/cm}^3$.

Pomysł stosowania stopów magnezu w lotnictwie nie jest wymysłem dzisiejszych konstruktorów, gdyż narodził się już dawno temu. Dla przykładu można tu przytoczyć artykuł z magazynu The Rotarian z maja 1932 roku. Opisane w nim zostało wiele korzyści płynących ze stosowania stopów magnezu w Europie, zarówno w lotnictwie jak i ogólnie w przemyśle.

W niniejszej pracy postaram się zbadać, na podstawie własnych obliczeń a także innych źródeł wymienionych w bibliografii, czy stosowanie stopów magnezu może być opłacalne inżynierskiego punktu widzenia.

WŁAŚCIWOŚCI STOPÓW

Aby lepiej zrozumieć różnice pomiędzy poszczególnymi stopami magnezu, warto dowiedzieć się, jakie materiały wchodzi w jego skład i jak wpływają na jego właściwości. Wzorując się na [1], najczęściej spotykanymi składnikami są m.in.:

- Lit – zdecydowanie zmniejsza gęstość stopu, jego duża zawartość sprawia, że stopy mają praktycznie zmniejszoną wrażliwość na działanie karbu.
- Aluminium – podwyższa twardość i własności wytrzymałościowe, wadą jest skłonność do mikroporowatości.
- Cynk – podwyższa wytrzymałość, powoduje rozdrobnienie ziarna, wadą jest skłonność do pęknięć na gorąco oraz zwiększenie kruchości.
- Mangan – podwyższa odporność na korozję, sprzyja rozdrobnieniu ziarna.
- Cyrkon – podwyższa plastyczność i nieznacznie wytrzymałość, powoduje rozdrobnienie ziarna.
- Tor – zwiększa wytrzymałość na pełzanie.

Jeżeli chodzi o proces wytwarzania zdecydowaną wadą jest konieczność stosowania inhibitorów w czasie odlewania, topienia lub skrawania ze względu na gwałtowne reagowanie magnezu z tlenem. Według [4] i [6] magnez, ze względu na jego małą pojemność cieplną, przy obróbce skrawaniem nie nagrzewa się gwałtownie. W związku z tym w procesie odlewania stopy stygną bardzo szybko, zaś narzędzia do skrawania mają od 5 do 10 razy dłuższą żywotność w porównaniu do tych stosowanych w obróbce aluminium. Cechy te znacznie zwiększają wydajność procesu wytwarzania. Kolejną zaletą jest fakt, iż większość stopów magnezu charakteryzuje się bardzo dobrą lejnią, dzięki czemu można odlewać skomplikowane kształty.

PORÓWNANIE STOPÓW MAGNEZU I ALUMINIUM

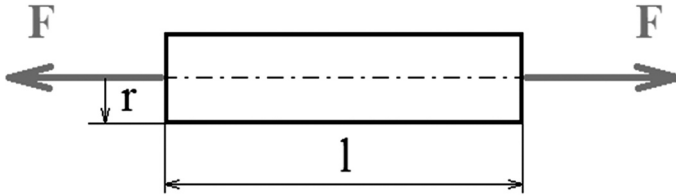
Decyzja o zastosowaniu w danym elemencie stopu magnezu zamiast np. stopu aluminium nie powinna być podjęta bez wcześniejszych obliczeń. Fakt, iż ten pierwszy jest dużo lżejszy od swoich typowych konkurentów, nie musi decydować o tym, że jest lepszy. Posiada on zazwyczaj słabsze właściwości mechaniczne, co przekłada się bezpośrednio na zwiększenie objętości danego elementu.

Moim zdaniem największym konkurentem dla stopów magnezu są stopy aluminium. W związku z tym w dalszej części będę zajmował się dwoma wybranymi przeze mnie przedstawicielami ww. materiałów. Będzie to stop magnezu o dużej wytrzymałości AZ80 oraz polski dural PA9 (przesycony, starzony naturalnie), który jest przeznaczony do bardzo silnie obciążonych elementów. Podstawowe dane materiałowe zostały zamieszczone w tabeli 1.

Tab. 1. Dane materiałowe wybranych stopów

Dane materiałowe	Stop magnezu AZ80	Stop aluminium PA9
ρ [g/cm ³]	1,80	2,81
Re [MPa]	215	440

Relacje pomiędzy tymi materiałami najlepiej pokazać na prostym modelu, takim jak np. przedstawiony na rysunku 1 walec. Jego wysokość wynosi l zaś promień r . Jest on rozciągany osiowo siłą F .



Rys. 1. Walec

Napężenia dopuszczalne:

- dla walca wykonanego ze stopu aluminium $k_{t_Al} = \frac{R_{e_Al}}{n_{bezp}}$
- dla walca wykonanego ze stopu magnezu $k_{t_Mg} = \frac{R_{e_Mg}}{n_{bezp}}$

Wyliczanie minimalnego promienia walca:

- dla walca wykonanego ze stopu aluminium

$$\sigma_{t_Al} = \frac{F}{\pi \cdot r_{Al}^2} \leq k_{t_Al} \rightarrow r_{Al} = \sqrt{\frac{F}{\pi \cdot k_{t_Al}}}$$

- dla walca wykonanego ze stopu magnezu

$$\sigma_{t_Mg} = \frac{F}{\pi \cdot r_{Mg}^2} \leq k_{t_Mg} \rightarrow r_{Mg} = \sqrt{\frac{F}{\pi \cdot k_{t_Mg}}}$$

Porównanie mas walców:

$$\frac{m_{Al}}{m_{Mg}} = \frac{V_{Al} \cdot \rho_{Al}}{V_{Mg} \cdot \rho_{Mg}} = \frac{\pi \cdot r_{Al}^2 \cdot l \cdot \rho_{Al}}{\pi \cdot r_{Mg}^2 \cdot l \cdot \rho_{Mg}} = \frac{\frac{F}{\pi \cdot k_{t_Al}} \cdot \rho_{Al}}{\frac{F}{\pi \cdot k_{t_Mg}} \cdot \rho_{Mg}} = \frac{k_{t_Mg} \cdot \rho_{Al}}{k_{t_Al} \cdot \rho_{Mg}} = \frac{R_{e_Mg} \cdot \rho_{Al}}{R_{e_Al} \cdot \rho_{Mg}}$$

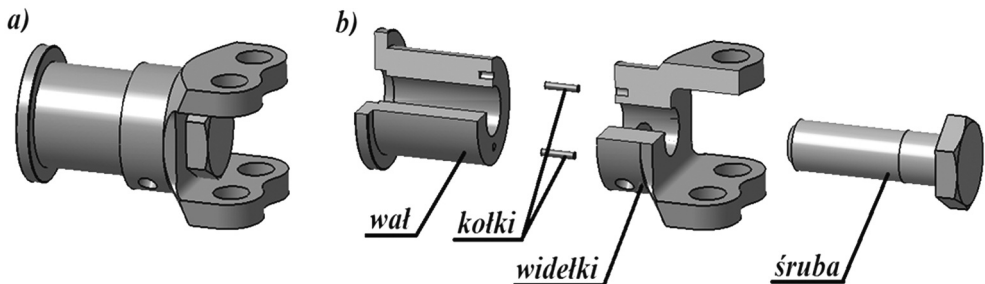
Dla danych zestawionych w tabeli 1 powyższy stosunek przyjmuje wartość, która zależy jedynie od właściwości materiału (pod warunkiem, że w obu przypadkach współczynniki bezpieczeństwa n_{bezp} są takie same).

$$\frac{m_{Al}}{m_{Mg}} = 0.76$$

Z powyższych obliczeń wynika, że jeżeli nie ma żadnych założeń ograniczających geometrię, element wykonany z PA9 powinien być lżejszy od wykonanego z AZ80 o około 24%. Dotyczy to omówionego powyżej prostego przypadku obciążenia, co nie znaczy, że w bardziej złożonym nie otrzymamy podobnej zależności.

Jeżeli istnieje z jakiegoś powodu konieczność zwiększenia wymiarów elementu, które zostały wcześniej wyznaczone z obliczeń wytrzymałościowych, uzasadnione może się stać użycie stopu magnezu. Dobrym przykładem jest felga używana w bolidach formuły F1. Odkuwa się ją z jednego kawałka stopu magnezu, dzięki czemu element jest dużo bardziej wytrzymały. Wymiary zewnętrzne felgi narzucone są m.in. przez szerokość opony i wysokość koła. Należy jednak wspomnieć o prawdopodobieństwie zapalenia się felgi w przypadku pęknięcia opony. Związane jest to z tarciem przebitego koła o chropowatą nawierzchnię toru. Dlatego felgi wykonane ze stopu magnezu uważane są za bardziej niebezpieczne i stosowanie ich w wielu dyscyplinach sportów motorowych jest zakazane. Pomimo tego konstruktorzy bolidów F1 są gotowi podejść to ryzyko właśnie ze względu na znaczną oszczędność masy.

Przykładem doboru materiału, w którym głównym kryterium jest otrzymanie jak najmniejszej masy, mogą być wykonane przeze mnie obliczenia dotyczące piasty śmigła o zmiennym skoku łopat. Skupiłem się tu głównie na samym wale, który został przedstawiony na rysunku 2. Połączony jest on z widełkami, do których następnie przymocowana jest łopata śmigła. Może się on obracać względem swojej osi podłużnej, dzięki czemu możliwa jest zamiana skoku. Całość zamknięta jest w korpusie i osadzona na wał silnika. Analizując poniższe obliczenia zamierzam pokazać, kiedy warto używać stopów magnezu zamiast stopów aluminium a kiedy jest to nieopłacalne.



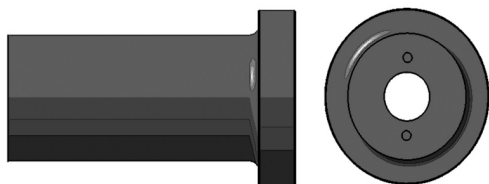
Rys. 2. Sposób połączenia wału piasty z widełkami: a) elementy złożone b) elementy rozłożone

Poniżej przedstawione są dwa przypadki, które różnią się między sobą sposobem połączenia wału z widełkami.

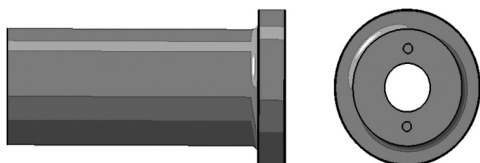
Przypadek 1. Wał z widełkami połączony za pomocą śruby i kołków

Wymiary elementu nie wynikają jedynie z warunków wytrzymałościowych konstrukcji ale także od sposobu połączenia wału z widełkami. W tym wypadku głównymi parametrami ograniczającymi jest minimalna średnica śruby oraz kołków.

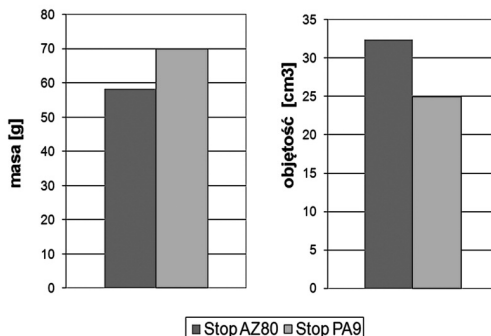
a) wał wykonany ze stopu AZ80



b) wał wykonany ze stopu PA9



Porównanie mas i objętości wałów wykonanych ze stopu AZ80 i PA9



Dane do wykresów:

		Materiał		Różnica w [%]	
		Stop AZ80	Stop PA9		
masa [g]	58,3	masa [g]	70,00	m_{AZ80}/m_{PA9}	16,7
objętość [cm ³]	32,4	objętość [cm ³]	24,92	V_{PA9}/V_{AZ80}	23,1

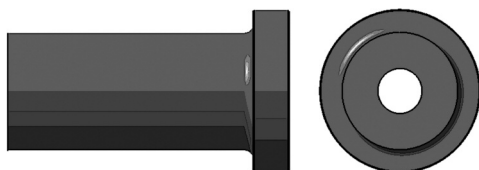
Rys. 3. Dobór materiału na wał: przypadek 1

Jak wynika z rysunku 3 zastosowanie stopu magnezu pozwala zaoszczędzić prawie 17% masy. Należy jednak zwrócić uwagę, że objętość takiego elementu będzie o ok. 23% większa od wału wykonanego ze stopu aluminium. W tym przypadku wpływa to bezpośrednio na zwiększenie wymiarów korpusu, a zatem i na jego wagę. W związku z tym, aby upewnić się, czy warto zastosować materiał AZ80 zamiast PA9 należałoby sprawdzić różne konfiguracje. Takie obliczenia wymagają więcej czasu ale dzięki nim jest szansa na otrzymanie lżejszej konstrukcji.

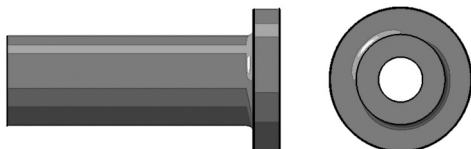
Przypadek 2. Wał z widełkami połączony za pomocą śruby, bez kołków

Założeniem jest zastosowanie innej metody, która nie wymaga drążenia otworów w czołowej części wału, dzięki czemu jego średnica zewnętrzna będzie bezpośrednio wynikać z warunków wytrzymałościowych.

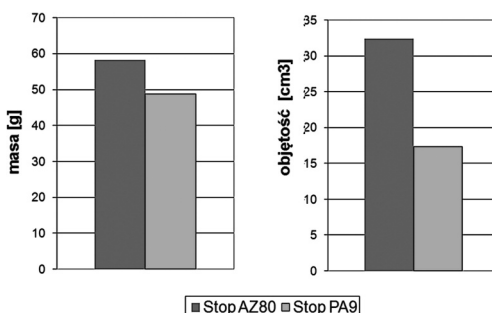
a) wał wykonany ze stopu AZ80



b) wał wykonany ze stopu PA9



Porównanie mas i objętości wałów wykonanych ze stopu AZ80 i PA9



Dane do wykresów:

		Materiał		Różnica w [%]	
		Stop AZ80	Stop PA9		
masa [g]	58,3	masa [g]	48,70	m_{PA9}/m_{AZ80}	16,5
objętość [cm ³]	32,4	objętość [cm ³]	17,31	V_{PA9}/V_{AZ80}	46,6

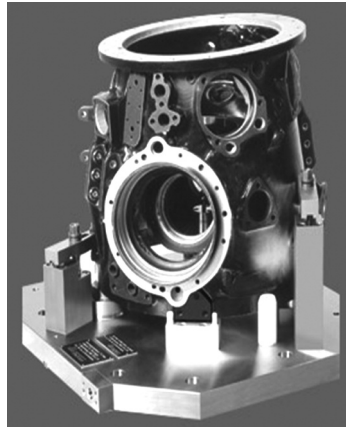
Rys. 4. Dobór materiału na wał: przypadek 2

Wyniki otrzymane w przypadku 2 zdecydowanie różnią się od tych otrzymanych we wcześniejszym przykładzie. Tym razem wał ze stopu aluminium posiada nie tylko mniejszą objętość o prawie połowę, ale także jest lżejszy o 16,5%. Zatem zastosowanie stopu AZ80 zamiast PA9 w tym wypadku byłoby nieuzasadnione.

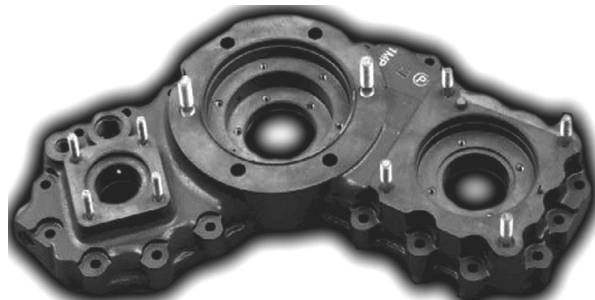
Powyższe przypadki miały na celu potwierdzenie wykonanych wyżej obliczeń, z których wynika, że przynajmniej dla prostego przypadku, jeżeli nie ma żadnych warunków narzucających wymiary (przypadek 2), nie opłaca się stosować stopów magnezu zamiast stopów aluminium. Sytuacja ta może się zmienić, jeżeli poza warunkami wytrzymałościowymi są także geometryczne (przypadek 1).

PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA STOPÓW MAGNEZU W LOTNICTWIE

Przykładem zastosowania stopu magnezu w przemyśle lotniczym może być RZ5, który według [2], stosowany jest do produkcji odlewów obudowy przekładni śmigłowca. Materiał ten cechuje się małą gęstością i dobrym właściwościami mechanicznymi. Obecnie jednak zostaje on stopniowo zastępowany nowocześniejszym stopem WE43, który odznacza się większą wytrzymałością i jest bardziej odporny na korozję. Dzięki jego zastosowaniu czas pomiędzy kolejnymi przeglądami technicznymi został znacznie wydłużony. Śmigłowce, w których został użyty ten stop to m.in. Eurocopter EC 120, zaawansowany technicznie NH Industries NH90 oraz Sikorsky S92. Na rysunkach 5 i 6 znajdują się przykładowe zdjęcia elementów wykonanych ze stopu magnezu.



**Rys. 5. Obudowa przekładni śmigłowca wykonana ze stopu magnezu
(źródło: www.kometgroup.com)**



**Rys. 6. Pokrywa obudowy przekładni śmigłowca wykonana ze stopu magnezu
(źródło: www.starwin-ind.com)**

Innym przykładem użycia stopów magnezu w przemyśle może być zastosowanie MSR i RZ5 w silnikach Rolls Royce oraz BMW. Materiały tego typu można spotkać także w podzespołach takich samolotów jak General Dynamics F16, Eurofighter EF2000, Panavia Tornado, Airbus A320 czy Aérospatiale-BAC Concorde.

PODSUMOWANIE

Stopy magnezu stosowane są już od dawna w przemyśle lotniczym. Początki jednak nie były łatwe ze względu na wiele problemów, którym próbowali stawić czoła ówcześni inżynierowie. Na szczęście od tamtego czasu materiały te są stale ulepszane, czego dowodem są posiadające dużą wytrzymałość i odporność na korozję AZ80 lub WE43. Ten ostatni według [7] dodatkowo może pracować w podwyższonych temperaturach.

Podsumowując, w związku z możliwością zredukowania masy, jak to było przedstawione na przykładzie wału piasty, przy jednoczesnym zachowaniu dobrych właściwości mechanicznych, stopy magnezu stają się coraz bardziej atrakcyjne dla konstruktorów. Udział tych materiałów w wielu konstrukcjach z roku na rok jest coraz większy. Można zatem zaryzykować hipotezę, że stopy magnezu będą odgrywać coraz większą rolę w przemyśle. Dodatkowym atutem jest fakt, iż już od pewnego czasu na świecie istnieje tendencja do dbania o środowisko, co w przypadku lotnictwa związane jest bezpośrednio ze zmniejszeniem spalania paliwa, a to z kolei najprościej można osiągnąć obniżeniem masy statków powietrznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Jan Chodorowski, Andrzej Ciszewski, Tadeusz Radomski: Materiałoznawstwo lotnicze. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003 r.
- [2] L. Duffy: Materials World, Tom 4. Nr. 3, 1996
- [3] Leland D. Case: The Search for New Alloys, The Rotarian, maj 1932r.
- [4] <http://www.ntp.com.pl>
- [5] <http://www.mosiadz.korozja.be/>
- [6] <http://www.polmag.pl>
- [7] <http://www.magnesium-elektron.com>

BARTOSZ JANIK

THE USAGE OF MAGNESIUM ALLOYS IN THE AIRCRAFT INDUSTRY

Summary

Since the XX century magnesium alloys has been used in aerospace industry. However, at that time there were many serious problems, like corrosion and fire threat, that were difficult to solve and cope with. The main goal of this article was finding out, if magnesium alloys have been changed and developed enough to be competitive to other materials used nowadays in the aerospace industry. Analysis was carried out basing on calculations and many other sources described in this article. Part of this work deals with description of usage of magnesium alloys in contemporary aerospace industry, which can prove its value and usefulness.