IMiB
Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
2019(1)
Gliwice
WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY
POLITECHNIKA ŚLĄSKA
PRACE INSTYTUTU MATERIAŁÓW INŻYNIERSKICH I BIOMEDYCZNYCH

Odporność korozyjna odlewniczych stopów Mg-Li

A. Skrzypczyk [a], M. Król [b]

[a] - Student Politechniki Śląskiej, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska
e-mail: a.skrzypczyk.a@gmail.com

[b] - Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska
e-mail: mariusz.krol@polsl.pl

Streszczenie:
Celem badań było określenie odporności na korozję, twardości i struktury oraz wielkości ziarna ultralekkich stopów Mg-Li z dodatkiem aluminium oraz modyfikatorów takich jak cyrkon, stront oraz tytan i bor. Badania miały na celu określenie zdolności stopów do zastosowania ich we współczesnej inżynierii materiałowej.

Abstract:
The aim of the study was to compare the corrosion resistance, hardness and microscopic structure of the cross-section and grain size of ultra-light Mg-Li alloys with the addition of aluminum and modifiers such as zirconium, strontium and titanium and boron. The research was aimed at determining the ability of alloys to apply them in modern material engineering.

Słowa kluczowe: Magnez i jego stopy, odlewnicze stopy Mg, ultralekkie stopy Mg-Li, odporność korozyjna stopów Mg-Li

Keywords: Magnesium and its alloys, foundry Mg alloys, ultra-light Mg-Li alloys, corrosion resistance of Mg-Li alloys

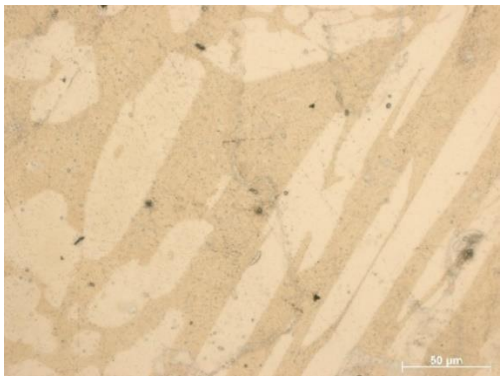
1. WSTĘP

Współczesny rynek przemysłowy jest bardzo wymagający, dostępna jest szeroka gama materiałów konstrukcyjnych - dzielących się na metale i ich stopy, ceramikę, polimery oraz kompozyty, które determinowane są poprzez ich sposób wytwarzania i przetwarzania, właściwości, strukturę czy zastosowanie. Rodzaj zastosowanego materiału wpływa na funkcje użytkowe wytwarzanych przedmiotów, które bezustannie poddawane są ewolucji, a co za tym idzie wpływają na rozwój materiałów inżynierskich [1, 2].

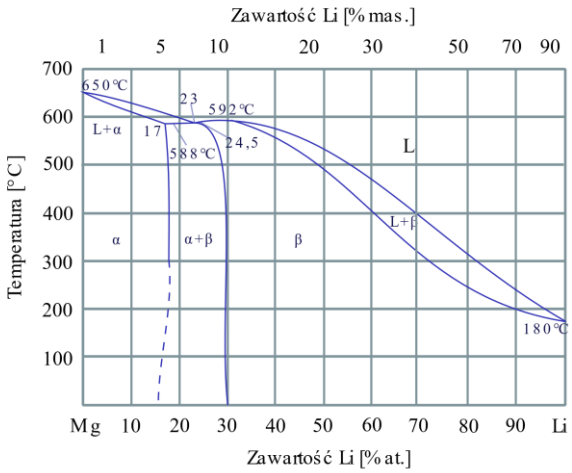
Rozwój metali lekkich umożliwia zastosowanie nowych konstrukcji o obniżonej masie z utrzymaniem lub zwiększeniem ich trwałości. Stopy magnezu, podobnie jak tytanu oraz aluminium należą do grupy stopów lekkich, które w dzisiejszym świecie poddawane są różnorodnym badaniom i znajdują zastosowane w coraz szerszych gałęziach przemysłu [2].

W tym obszarze poszukiwań można wyróżnić stopy z dodatkiem litu. Wraz z magnezem tworzy on stopy ultralekkie, o gęstości 1,35 – 1,65 g/cm^3, bardzo korzystnie wpływając na odkształcalność stopów magnezu. Szczególną właściwością stopów magnezu z litem jest ich wysoka sztywność i dobra odkształcalność, która dostrzegalna jest również w wysokich temperaturach, dobre ekranowanie elektromagnetyczne, a także możliwość powtórnego wykorzystania. Pomimo zalet są one ograniczone w użytku ze względu na inne niewystarczające właściwości, z których głównym mankamentem jest słaba wytrzymałość. Tak jak zostało to wspomniane, w tym momencie stopy Mg-Li nie są powszechnie stosowane, ale poddawane coraz szerszym badaniom. Ich użytek ograniczają własności mechaniczne, zwłaszcza w stanie lejnym oraz niska odporność korozyjna [2-4].

Lit bardzo korzystnie wpływa na odkształcalność stopów magnezu, za pomocą zastąpienia trudno odkształcalnej sieci heksagonalnej (faza α), przez sieć regularną (faza β), niestety równocześnie niekorzystnie wpływa na obniżenie wytrzymałości na skutek pojawienia się wyżej wymienionej fazy β. Najbardziej korzystna kombinacja własności mechanicznych stopów, występuje więc w zakresie stopów dwufazowych α+β przedstawionej na rysunku 1 (przy zawartości litu w zakresie 17-24,5% atomowych litu). Charakterystyczną cechą stopów magnezu z litem jest ich wysoka sztywność i dobra odkształcalność, którą obserwuje się również w wysokich temperaturach. Wykres równowagi fazowej Mg-Li został przedstawiony na rysunku 2 [4-7].



Rysunek 1. Struktura dwufazowa stopu około eutektycznego Mg-9Li
Figure 1. Two-phase structure of the alloy near eutectic Mg-9Li



Rysunek 2. Wykres równowagi fazowej Mg-Li [4]
Figure 2. The Mg-Li phase equilibrium diagram [4]

2. MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

Materiał badawczy przygotowano z 15 rodzajów odlewów (odlewanie do form piaskowych) stopów Mg-Li. Pierwiastki wsadowe stanowiły: magnez o czystości technicznej powyżej 99% Mg oraz aluminium 3N8 o czystości powyżej 99,98% Al, a także modyfikatory: cyrkon (AlZr10), stront (AlSr10) i tytan (TIBOR - zaprawa na osnowie aluminium, zawierająca tytan, bor żelazo, krzem oraz wanad). Wytapianie i odlewania stopów przeprowadzone zostało w laboratoryjnym, indukcyjnym, jednokomorowym piecu próżniowym w atmosferze argonu, przy ciśnieniu 650 Tor i w temperaturze 700-720ºC, w którym komora topienia i odlewania, jednocześnie stanowi komorę form i wlewnic do tygli z Al_2O_3. Badane stopy Mg-Li z dodatkami stopowymi zostały przedstawione w tablicy 1.

Tablica 1. Oznaczenia stopów użytych do badań
Table 1. Determinations of alloys used for testing

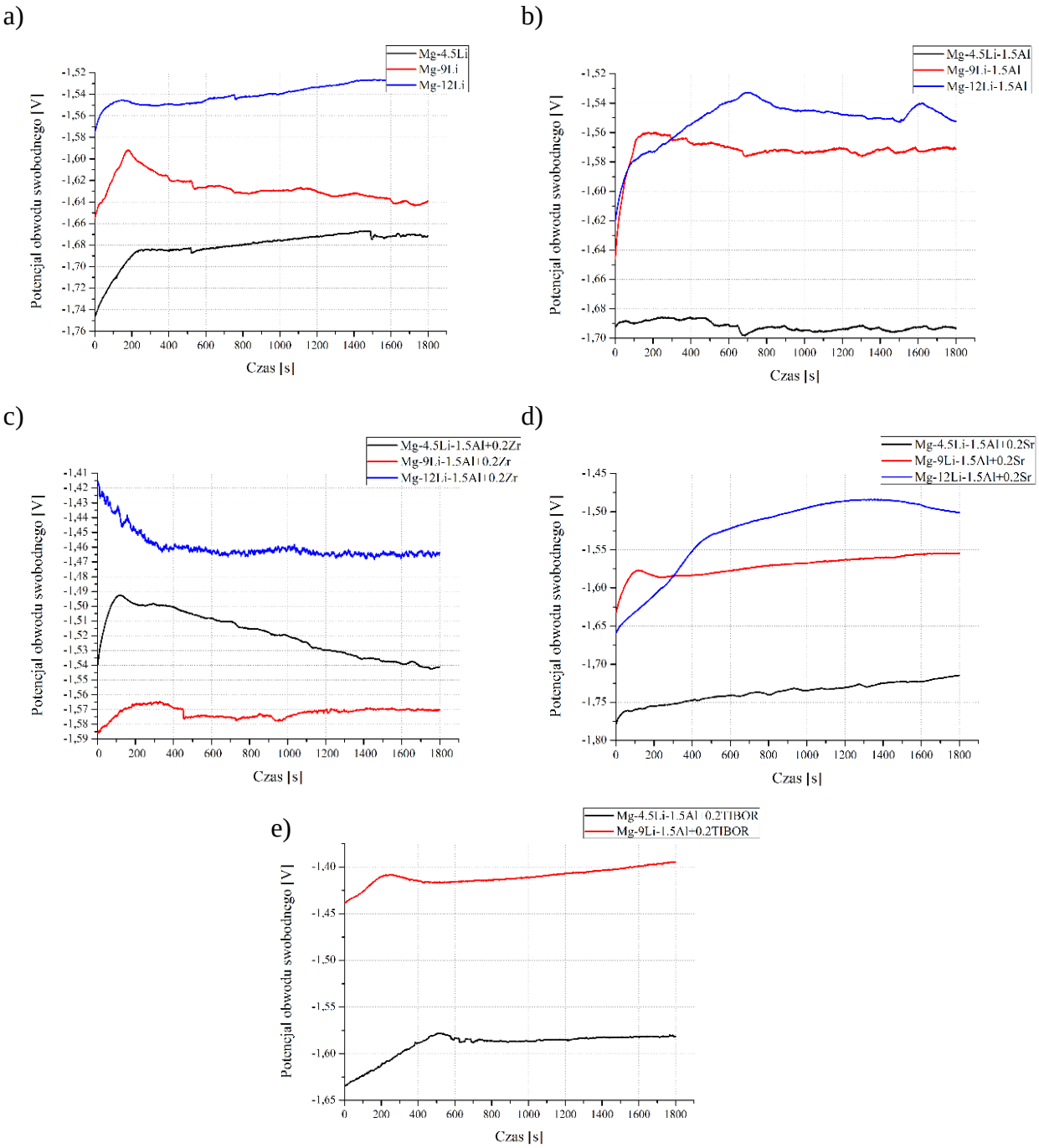
Lp.	**Nazwa stopu**
1	Mg-4.5Li
2	Mg-4.5Li-1.5Al
3	Mg-4.5Li-1.5Al+0.2Zr
4	Mg-4.5Li-1.5Al+0.2TiBor
5	Mg-4.5Li-1.5Al+0.2Sr
6	Mg-9Li
7	Mg-9Li-1.5Al
8	Mg-9Li-1.5Al+0.2Zr
9	Mg-9Li-1.5Al+0.2TiBor
10	Mg-9Li-1.5Al+0.2Sr
11	Mg-12Li
12	Mg-12Li-1.5Al
13	Mg-12Li-1.5Al+0.2Zr
14	Mg-12Li-1.5Al+0.2TiBor
15	Mg-12Li-1.5Al+0.2Sr

2.1. OCENA ODPORNOŚCI KOROZYJNEJ PRZY POMOCY KOROZYJNYCH CHARAKTERYSTYK PRĄDOWYCH

Polaryzacyjne badania korozyjne przeprowadzono za pomocą charakterystyk stałoprądowych wyrażonych przy pomocy krzywych polaryzacji potencjostatycznych, przy których potencjał elektrody badanej E miał stałą wartość E, a prąd I był rejestrowany w funkcji czasu oraz krzywej gęstości prądu do potencjału. Charakterystykę korozji próbek badano na obszarze roboczym stanowiącym 1cm^2 stopu. Pomiar krzywych wykonany został w jedno molowym roztworze NaCl (przy stałym pH 7 i temperaturze pokojowej 20°C), w którym znajdowały się trzy elektrody: elektroda badana (próbka), elektroda odniesienia, którą stanowiła elektroda chlorosrebrowa Ag/AgCl i przeciwelektroda, którą była stal nierdzewna. Badanie potencjału stacjonarnego w funkcji czasu przeprowadzano w otwartej pętli potencjostatu przez 30 min, a badania gęstości prądu do potencjału w zamkniętej pętli przez około 300s. Wyniki zostały wygenerowane w postaci plików tekstowych, które następnie zostały przemienione na postać graficzną i przedstawione na rysunku 3 i 4.

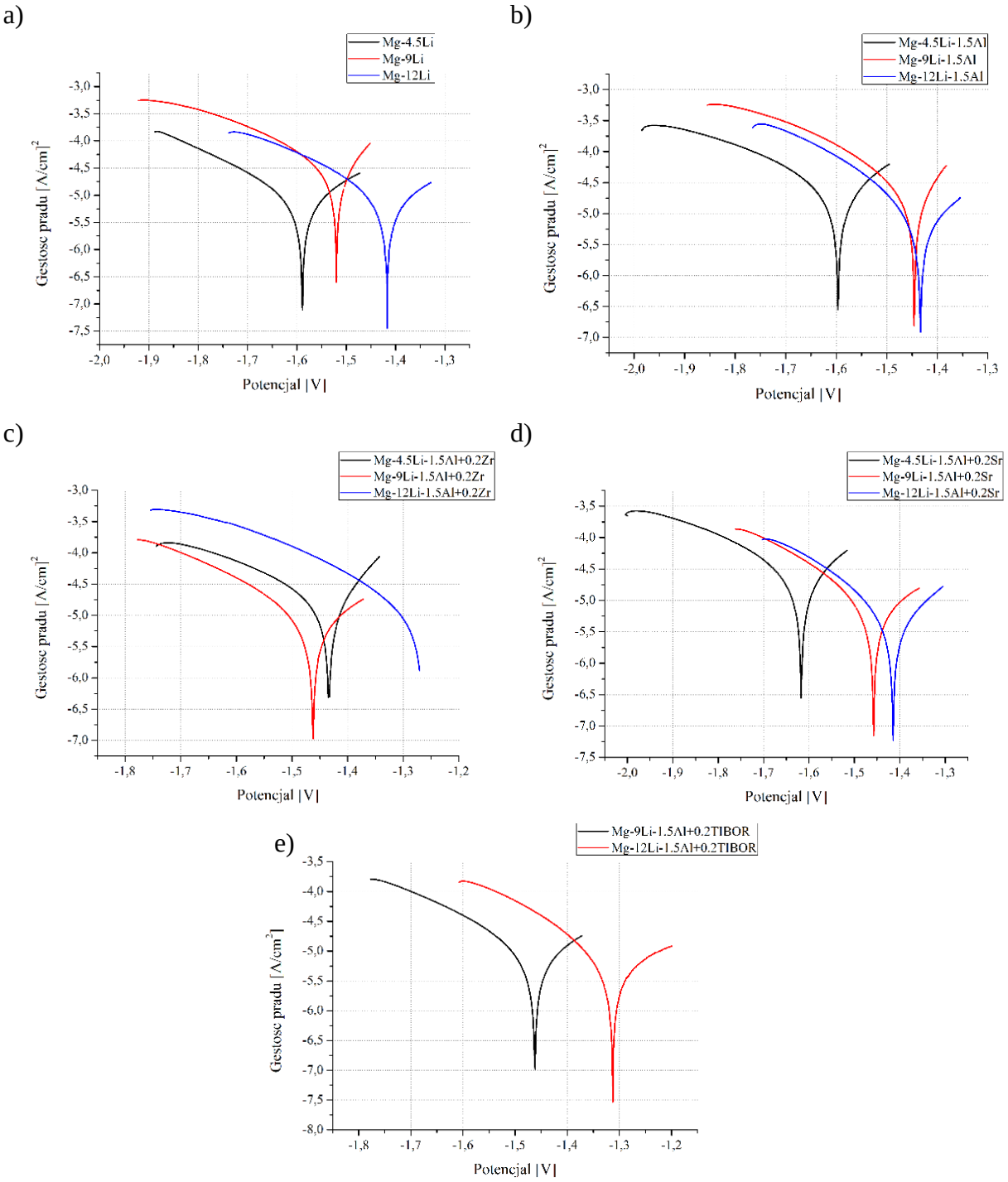
Wykresy charakteryzują się zmniejszeniem podatności na korozję wraz ze wzrostem litu. Wyjątek stanowi stop Mg-9Li-1.5Al+0.2Zr, który posiada najniższy potencjał wśród stopów modyfikowanych Zr, co może być spowodowane niewłaściwym przygotowaniem

powierzchni próbki przed badaniem. Dodatek aluminium nie wpływa w znaczący sposób na odporność na korozję, a modyfikatory Zr, Sr praz Ti pogarszają tę własność. Wszystkie wykresy na rysunku 4 to krzywe polaryzacji z aktywnym roztwarzaniem, które mogą wskazywać korozję wżerową, na którą szczególnie podatne są stopy magnezu. Potencjał korozyjny maleje wraz ze wzrostem zawartości litu w stopie. Dodatek modyfikatorów tak jak w pierwszym eksperymencie wpływa na pogorszenie odporności korozyjnej, a aluminium nie wpływa na tę własność.



Rysunek 3. Zestawienie porównawcze potencjału obwodu swobodnego w czasie w stopach o różnej zawartości pierwiastków: a) Mg-Li, b) Mg-Li-Al, c) Mg-Li-Al+Zr, d) Mg-Li-Al+TiBor, e) Mg-Li-Al+Sr

Figure 3. Comparative comparison of the potential of a free-circuit over time in alloys with different content of elements: a) Mg-Li, b) Mg-Li-Al, c) Mg-Li-Al+Zr, d) Mg-Li-Al+TiBor, e) Mg-Li-Al+Sr



Rysunek 4. Zestawienie porównawcze gęstości prądu do potencjału w stopach o różnej zawartości pierwiastków: a) Mg-Li, b) Mg-Li-Al, c) Mg-Li-Al+Zr, d) Mg-Li-Al+TiBor, e) Mg-Li-Al+Sr

Figure 4. Comparison of the current density to the potential in alloys with different content of elements: a) Mg-Li, b) Mg-Li-Al, c) Mg-Li-Al+Zr, d) Mg-Li-Al+TiBor, e) Mg-Li-Al+Sr

2.2. BADANIA MIKROSKOPOWE

W celu określenia mikrostruktury badanych stopów Mg-Li, przeprowadzono obserwacje mikroskopowe z użyciem mikroskopu świetlnego. Chcąc ujawnić mikrostrukturę, wcześniej przygotowane próbki zostały poddane trawieniu w odczynniku: 1ml HNO_3, 24ml H_2O i 75ml glikolu etylowego. Czas trawienia został dobrany eksperymentalnie i wynosił: 5 – 15s. Pomiar wielkości ziarna wykonano w celu określenia wpływu dodatków stopowych oraz modyfikatorów na wielkość ziarna. Wielkość ziarna wyznaczono w oparciu o metodę liniową. Na podstawie 5 zdjęć uzyskano po 50 wyników, z których wyznaczono wartość średnią, odchylenie standardowe oraz błąd pomiarowy.

Przedstawione zdjęcia mikrostruktury (rysunki 5-13) pozwalają zauważyć różnice w mikrostrukturze, ze względu na dodatki stopowe dotyczące wielkości i kształt ziarna, granice ziarn, strukturę oraz widoczne fazy i wydzielenia. W celu określenia struktury stopów odwołano się do rysunku 2 przedstawiającego wykres równowagi fazowej Mg-Li, zwracając uwagę na zawartość litu w badanych stopach. Na podstawie wykresu stwierdzono, że stop z 4,5% zawartością litu charakteryzuje się strukturą α-Mg, stop o zawartości 9% litu strukturą dwufazową α-Mg+β-Li, a stop 12% β-Li.

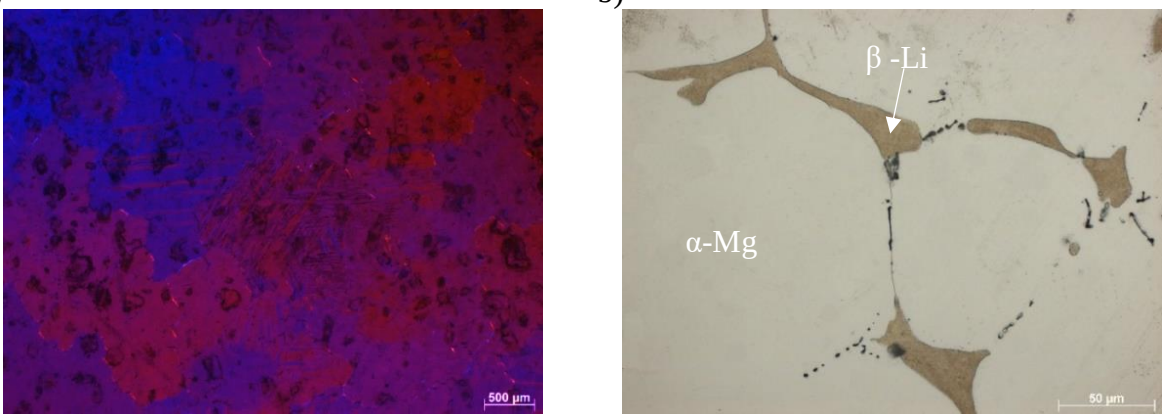
Rysunek 5 przedstawia stop magnezu z 4,5% zawartością litu, charakteryzujący się strukturą α-Mg oraz występującą w małej ilości na jej granicach β-Li. Przedstawiona mikrostruktura stopu charakteryzuje się gruboziarnistą budową o regularnych kształtach i lekko widocznych granicach ziarn. Rysunek 6 przedstawia ten sam stop z 1,5% dodatkiem aluminium, które tworzy strukturę dendrytyczną. Struktura charakteryzuje się drobniejszym ziarnem i mocno widocznymi granicami ziarn. Rysunek 7 przedstawia modyfikację stopu poprzez dodanie cyrkonu. Struktura charakteryzuje się mocniejszym rozdrobnieniem ziarna. Widoczna jest faza α-Mg z wydzieleniami eutektycznymi na granicy ziarna w postaci fazy α i fazy $Mg_{17}Al_{12}$.

Rysunek 8 przedstawia mikrostrukturę stopu magnezu o zawartości 9% litu. Struktura charakteryzuje się strukturą α+β oraz drobnoziarnistą, iglastą budową. Rysunek 9 przedstawia stop Mg-9Li-1.5Al, w którym aluminium powoduje zwiększenie wielkości ziarna (gruboziarnista struktura). Tak samo jak w stopie Mg-9Li struktura charakteryzuje się budową iglastą. Aluminium powoduje ujednolicenie struktury i granic ziarn, tworząc ją bardziej regularną. Rysunek 10 pokazuje powyższy stop modyfikowany dodatkiem cyrkonu, który negatywnie wpłynął na pojawienie się jam skurczowych. Rysunki 11 i 12 przedstawia strukturę Mg-9Li-1.5Al modyfikowaną strontem oraz tytanem. Struktura charakteryzuje się rozdrobnieniem ziarna, budową iglastą oraz strukturą dwufazową. Większe rozdrobnienie ziarna występuje przy dodatku strontu. Nie występują tutaj jamy skurczowe, a struktura jest jednorodna o regularnych granicach ziarn.

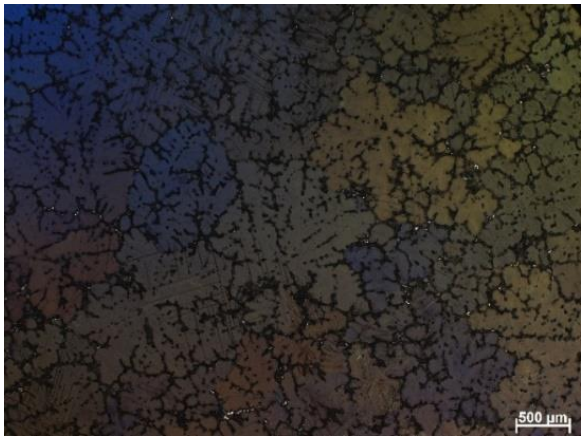
Rysunek 13 przedstawia stop Mg-12Li i charakteryzuje się się jednolitą budową oraz strukturą β-Li. Rysunki 14-17 ukazują stop z aluminium oraz dodanymi modyfikatorami w postaci Zr, Sr oraz tytanem. Stopy z modyfikatorami charakteryzują się mocniejszym rozdrobnieniem ziarna i zmniejszenie ich regularności (oprócz dodatku strontu).

W wyniku badań mikrostruktury można stwierdzić, że dodatek litu zgodnie z wykresem fazowym wpływa na strukturę stopu, a wraz ze wzrostem jego zawartości struktura staje się bardziej rozdrobniona, aluminium wpływa na zwiększenie wielkości ziarn, ujednolica strukturę oraz granice międzykrystaliczne, cyrkon powoduje powstanie jam skurczowych, stront korzystnie wpływa na rozdrobnienie ziarna, a zaprawa tytanowa ujednolica strukturę materiału.

a) b)

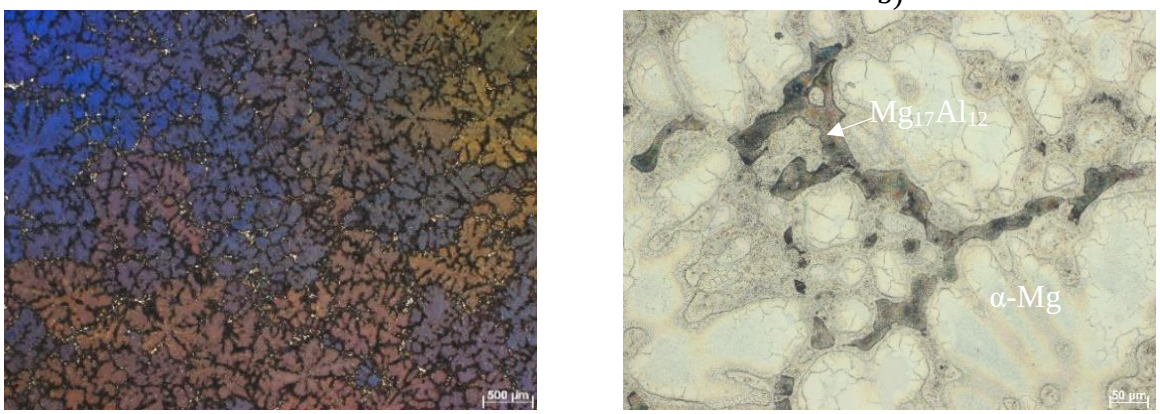


Rysunek 5. Struktura stopu Mg-4.5Li a) przy powiększeniu x25 b) przy powiększeniu x500
Figure 5. The structure of the Mg-4.5Li alloy a) x25 b) x500 magnification



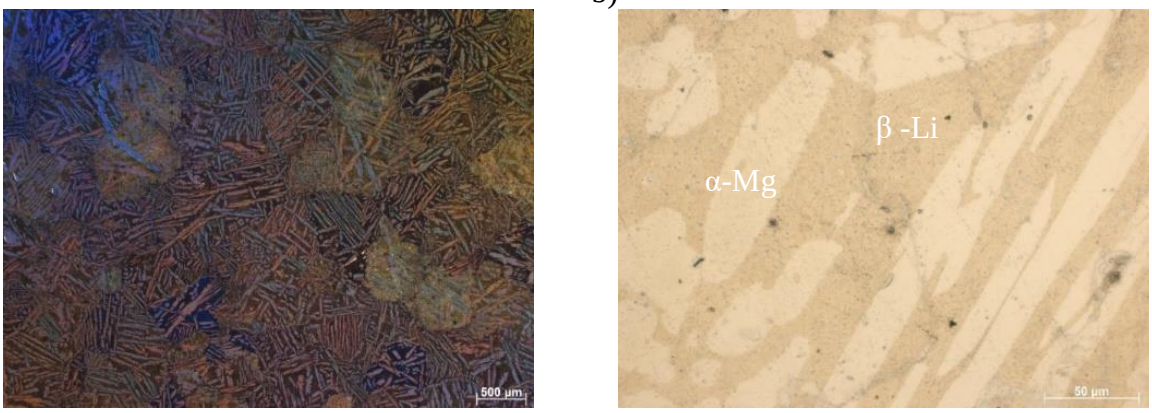
Rysunek 6. Struktura stopu Mg-4.5Li-1.5Al przy powiększeniu x25
Figure 6. The structure of the Mg-4.5Li-1.5Al alloy at x25 magnification

a) b)

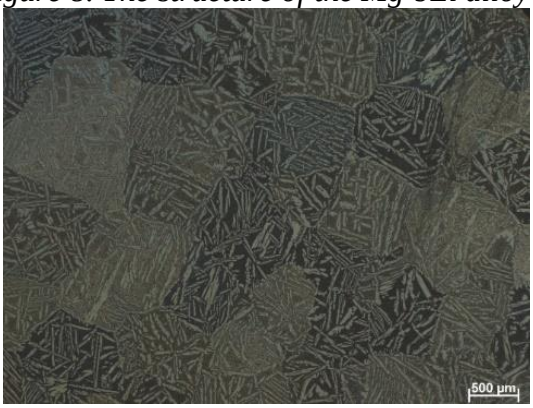


Rysunek 7. Struktura stopu Mg-4.5Li-1.5Al+0.2Zr a) przy powiększeniu x25 b) przy powiększeniu x500
Figure 7. Structure of the alloy Mg-4.5Li-1.5Al+0.2Zr a) x25 b) x500 magnification

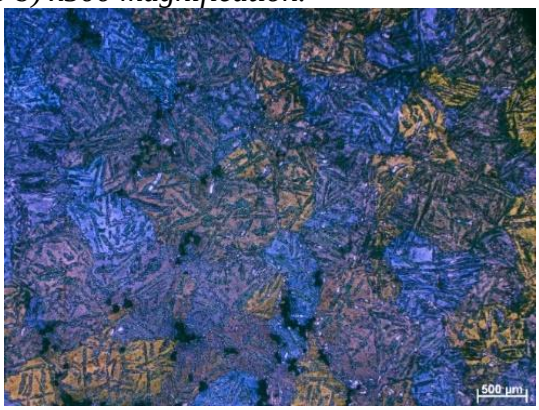
a) b)



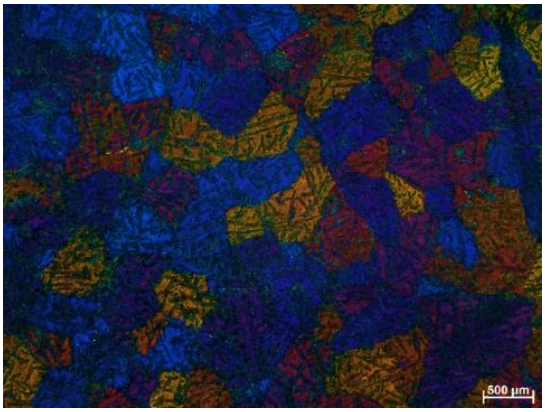
Rysunek 8. Struktura stopu Mg-9Li a) przy powiększeniu x25 b) przy powiększeniu x500
Figure 8. The structure of the Mg-9Li alloy a) x25 b) x500 magnification.



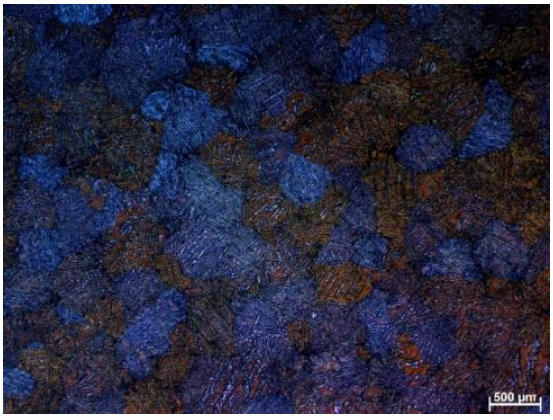
Rysunek 9. Struktura stopu Mg-9Li-1.5Al a) przy powiększeniu x25
Figure 9. Mg-9Li-1.5Al alloy structure at x25 magnification



Rysunek 10. Struktura stopu Mg-9Li-1.5Al+0.2Zr przy powiększeniu x25 z polaryzacją
Figure 10. The structure of the Mg-9Li-1.5Al+0.2Zr alloy at x25 magnification with polarization

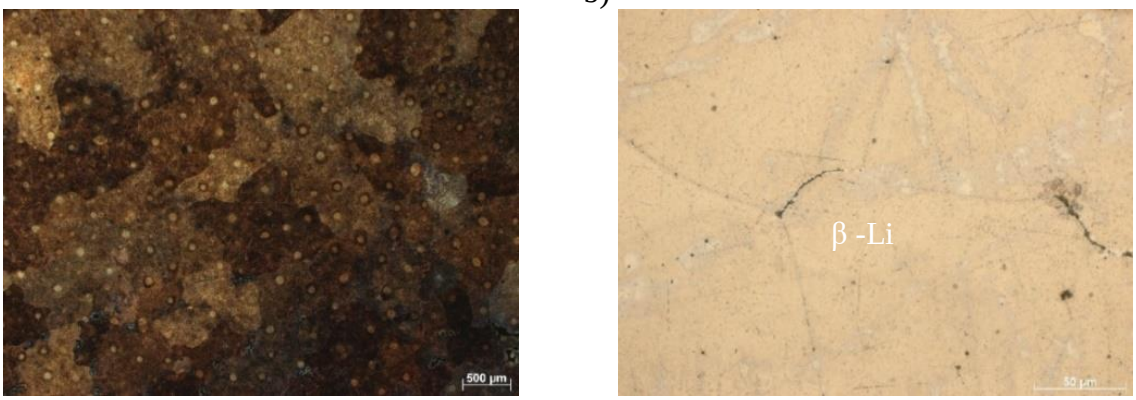


Rysunek 11. Struktura stopu Mg-9Li-1.5Al+0.2TiBor przy powiększeniu x25 z polaryzacją
Figure 11. The structure of the Mg-9Li-1.5Al+0.2TiBor alloy at a magnification of x25 with polarization

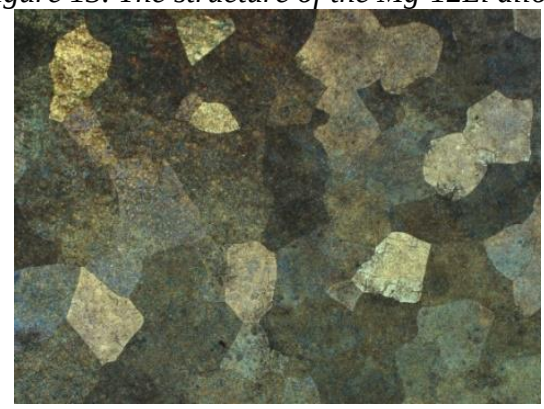


Rysunek 12. Struktura stopu Mg-9Li-1.5Al+0.2Sr przy powiększeniu x25 z polaryzacją
Figure 12. Structure of the Mg-9Li-1.5Al+0.2Sr alloy at a magnification of x25 with polarization

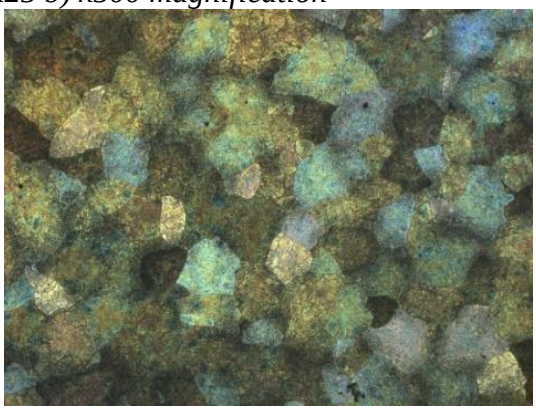
a) b)



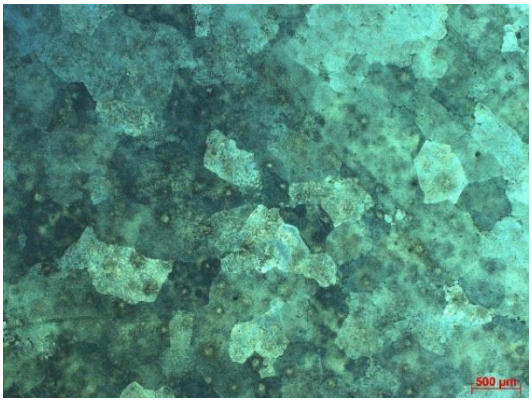
Rysunek 13. Struktura stopu Mg-12Li a) przy powiększeniu x25 b) przy powiększeniu 500
Figure 13. The structure of the Mg-12Li alloy a) x25 b) x500 magnification



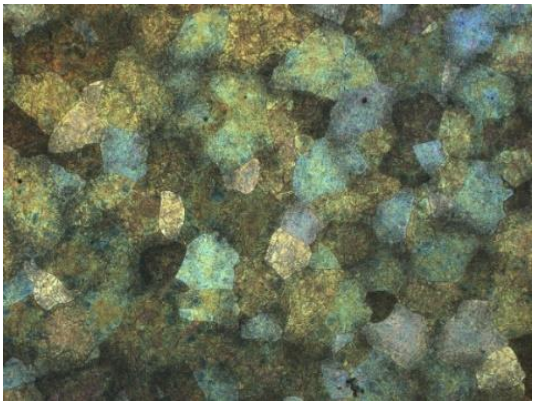
Rysunek 14. Struktura stopu Mg-12Li-1.5Al przy powiększeniu x25
Figure 14. The structure of the Mg-12Li-1.5Al alloy at x25 magnification



Rysunek 15. Struktura stopu Mg-12Li-1.5Al+0.2Zr przy powiększeniu x25
Figure 15. The structure of the Mg-12Li-1.5Al+0.2Zr alloy at x25 magnification



Rysunek 16. Struktura stopu Mg-12Li-1.5Al+0.2TiBor przy powiększeniu x25
Figure 16. The structure of the Mg-12Li-1.5Al+0.2TiBor alloy at x25 magnification

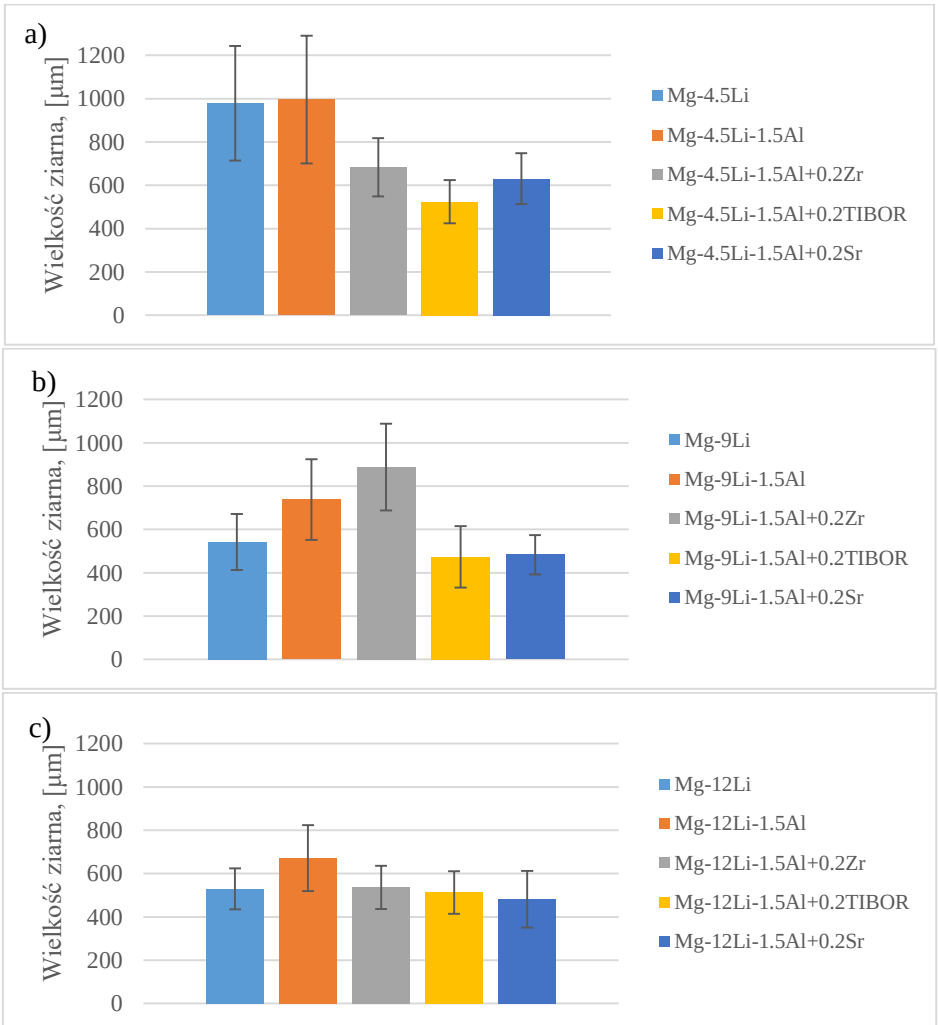


Rysunek 17. Struktura stopu Mg-12Li-1.5Al+0.2Sr przy powiększeniu x25
Figure 17. The structure of the Mg-12Li-1.5Al+0.2Sr alloy at x25 magnification

Wyniki badania wielkości ziarna w stopach Mg-Li zostały przedstawione na rysunku 18 za pomocą wartości średniej oraz błędu standardowego. Badania wielkości ziarna wykazały jak mocno modyfikacja wpływa na tą własność zmieniając ją prawie o 200 %: Mg-4.5Li – 979 µm i Mg-12Li-1.5Al+0.2Sr 481 µm

Dla badanych stopów o zawartości 4,5% litu można stwierdzić, że dodatek aluminium w niewielkim stopniu wpływa na zwiększenie wielkości ziarna, a modyfikatory znacznie rozdrabniają strukturę. Dla stopów o zawartości 9% litu dodatek aluminium również wpływa na zwiększenie wielkości ziarna stopu. Modyfikacja stopu za pomocą Zr, również zwiększa wielkość ziarna co może sugerować błąd pomiarowy (tak samo jak w przypadku korozji). Modyfikacje za pomocą Ti oraz Sr zdecydowanie obniżają wielkość ziarna. W stopie o zawartości 12% litu widoczna jest taka sama zależność: dodatek aluminium wpływa na zwiększenie wielkości ziarna, a modyfikatory obniżają wielkość ziarna.

W stopach Mg-Li oraz Mg-Li-Al oraz z modyfikatorami wraz ze wzrostem zawartości litu maleje średnia wielkość ziarna, jednakże pomiędzy stopem o zawartości 9% a 12% nie występuje już tak ewidentna różnica jak pomiędzy 4,5% a 9%. Główna zaobserwowaną tendencją jest to, iż zarówno przy wzroście zawartości litu, jak i udziale oraz wzroście zawartości modyfikatorów następuje obniżenie wielkości ziarna. Aluminium ewidentnie zwiększa wielkość ziarna, co może wpływać na pogorszenie własności materiału.



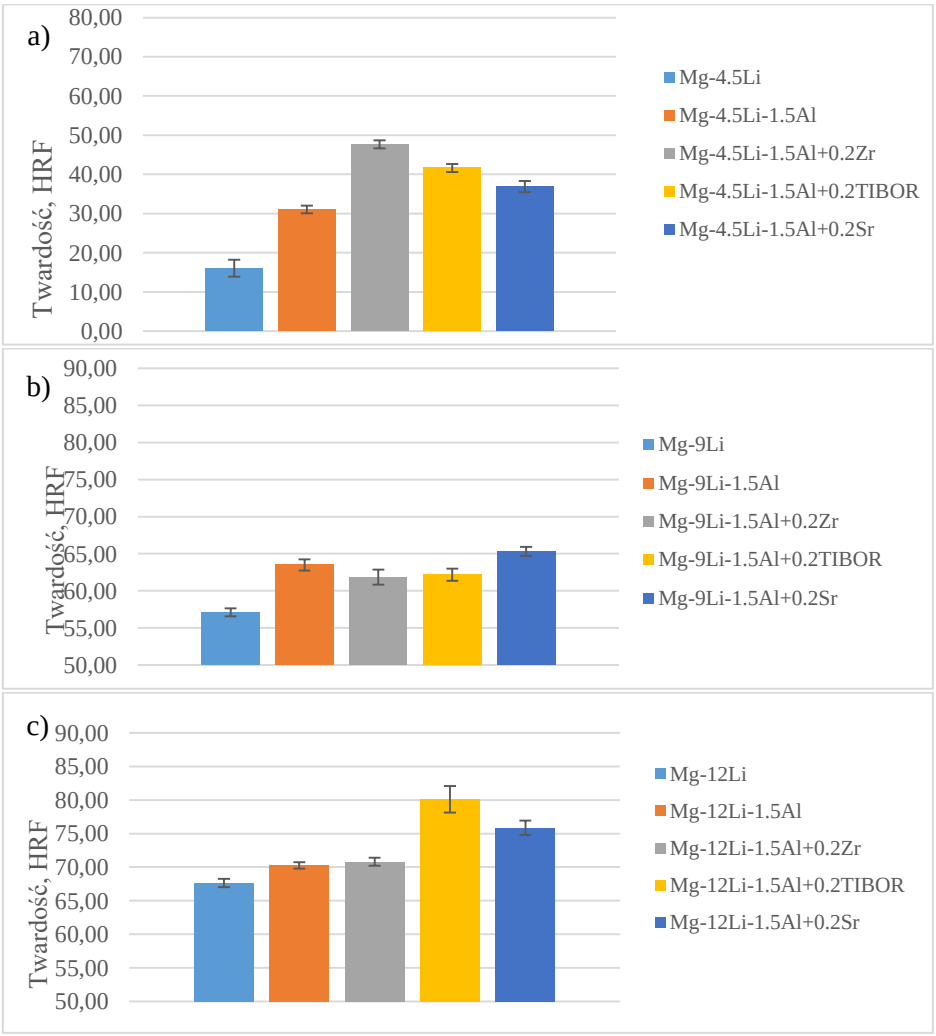
Rysunek 18. Zestawienie porównawcze średniej wielkości ziarna w stopach Mg-Li a) 4,5%, b) 9%, c) 12%

Figure 18. Comparison of average grain size in Mg-Li alloys a) 4.5%, b) 9%, c) 12%

2.3. POMIAR TWARDOŚCI

Pomiar twardości wykonano za pomocą metody Rockwella w skali F na urządzeniu firmy Zwick, zgodnie z normą PN-EN ISO 6508. Badanie przeprowadzono za pomocą stalowej kulki (1,588 mm) przy obciążeniu 60 kG. Twardość badano w 7 różnych miejscach, po czym odrzucano dwa skrajne wyniki, a resztę uśredniano oraz wyznaczano średnią twardość oraz błąd pomiarowy. Twardość próbek mierzono w celu określenia wpływu dodatków stopowych oraz modyfikatorów na wzrost twardości stopów Mg-Li. Wyniki badania twardości metodą Rockwella próbek stopów Mg-Li zostały przedstawione w rysunku 19.

Badania twardości metodą Rockwella wykazały, że najmniejszą wielkością ziarna charakteryzuje się stop Mg-4.5Li – 16 HRF, a największą Mg-12Li-1.5Al+0.2TIBOR – 80 HRF, co pokazuje nam jak mocno modyfikacja stopu wpływa na twardość stopów Mg-Li, zwiększając ją, aż o prawie 500%.



Rysunek 19. Zestawienie porównawcze średniej twardości stopów Mg-Li a) 4,5%, b) 9%, c) 12%

Figure 19. Comparison of average hardness of Mg-Li alloys a) 4.5%, b) 9%, c) 12%

Dla badanych stopów o zawartości 4,5% litu można stwierdzić, że dodatek aluminium prawie dwukrotnie wpływa na zwiększenie wielkości ziarna stopu. Modyfikacja stopu Mg-4.5Li-1.5Al za pomocą modyfikatorów dodatkowo poprawia twardość. Dla wszystkich

stopów o zawartości 9% litu twardość utrzymuje się na porównywalnym poziomie oscylując w granicach od 57 HRF do 64 HRF, będąc najniższą dla stopu Mg-9Li, a najwyższa dla stopu Mg-9Li-1.5Al+0.2Sr. W stopie o zawartości 12% litu twardość utrzymuje się na stałym poziomie, znacznie zwiększając się przy modyfikacji Ti oraz również Sr. W stopach Mg-Li oraz Mg-Li-Al wraz ze wzrostem zawartości litu rośnie twardość stopu, jednakże pomiędzy stopem o zawartości 4,5% a 9%, zmiana ta jest większa niż pomiędzy zawartością 9% a 12% (co może sugerować o wytworzeniu się fazy β o wyższej twardości już w stopie Mg-9Li). Twardość stopów z dodatkami modyfikatorów również rośnie wraz z zawartością litu. Główną zaobserwowaną tendencją jest to, iż zwiększenie zawartości litu powoduje zwiększenie twardości, a dodatek 1,5% aluminium dodatkowo poprawia tą właściwość. Dodatek modyfikatorów oprócz stopu o zawartości 4,5% litu jedynie nieznacznie wpływa na zwiększenie twardości stopów Mg-Li.

3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Ciągłe poszukiwania nowych materiałów spełniających wymagania nowoczesnych konstrukcji, minimalizacji masy przy zachowaniu wysokich własności, a nawet zwiększeniu trwałości - prowadzi do rozwoju i badań stopów magnezu należących do grupy stopów lekkich. Jednymi z badanych stopów magnezu są te z dodatkiem litu, tworzące stopy ultralekkie o wysokiej sztywności i dobrej odkształcalności plastycznej. Pomimo wymienionych cech, w dalszym ciągu ograniczone jest ich zastosowanie ze względu na niewystarczającą wytrzymałość i odporność korozyjną. Warto zwrócić uwagę, że na całym świecie prowadzone są badania i pokładane nadzieje na temat stopów Mg-Li, ich modyfikacji i odnalezienia złotego środka w przypadku dodatków stopowych.

Na podstawie otrzymanych wyników badań eksperymentalnych sformułowano następujące wnioski:

1. Wzrost zawartości litu powoduje zwiększenie potencjału obwodu otwartego, a co za tym idzie zmniejszenie odporności na korozję. Dodatek aluminium w stopach o zawartości 4,5% oraz 9% nie powoduje znaczącej zmiany tego potencjału, a dodatek modyfikatorów w większości przypadków pogarsza odporność na korozję. Przy przyłożonym prądzie, analizowane stopy zachowują się tak samo, zmniejszając odporność korozyjną wraz ze wzrostem zawartości litu.
2. Wzrost zawartości litu wpływa na zmianę struktury materiału od dendrytycznej, przez iglastą do struktury o równomiernych kształtach. Aluminium wpływa na zwiększenie wielkości ziarn. Modyfikator w postaci cyrkonu powoduje powstanie jam skurczowych, w postaci strontu korzystnie wpływa na rozdrobnienie ziarna, a jako zaprawa tytanowa – ujednolica strukturę materiału.
3. Wielkość ziarna maleje wraz ze wzrostem zawartości litu i udziałem modyfikatorów Zr, Sr i Ti, a wzrasta wraz z dodatkiem aluminium co może niekorzystnie wpływać na własności materiału.
4. Na podstawie badań twardości stwierdzono, że twardość rośnie wraz ze wzrostem zawartości litu, a dodatek aluminium w niewielkim stopniu poprawia jeszcze tą właściwość. Dodatek modyfikatorów w większości nieznacznie wpływa na twardość stopów Mg-Li.
5. Wyniki badanych stopów potwierdzają, iż dodatki stopowe – ich rodzaj i ilość, a także modyfikatory znacznie wpływają na badane własności.

LITERATURA

1. Luo A., Magnesium casting technology for structural applications, Journal of Magnesium and Alloys, Science direct, 2013, vol. 1, s. 2 -22.

2. Dziadoń A., Magnez i jego stopy, Samodzielna Sekcja "Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej", Kielce, 2012.
3. Mola R., Modyfikacja warstwy wierzchniej magnezu i jego stopów, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2012.
4. Orman M., Orman Z., Technologia magnezu i jego stopów, wyd. Śląsk, Katowice, 1965.
5. Białobrzeski A., Saja K., Hübner K., Stopy Ultralekkie Mg-Li, Przegląd Odlewnictwa, Stowarzyszenie Techniczne Odlewników Polskich, 2009, Vol. 59, nr 5-6, s. 276-288.
6. Mordike B., Ebert T., Magnesium Properties – applications – potential, Materials Science and Engineering, Elsevier, 2001, Vol. 302, s. 37-45.
7. Haferkamp H., Boehm R., Holzkamp U.,Jaschik Ch., Kaese H., Niemeyer M., Alloy Development, Processing and Application in Magnesium Lithium Alloys, Materials Transactions, J-Stage, 2001, Vol. 42, nr 7, s. 1160 – 1166.