



POLISH ACADEMY OF SCIENCES - COMMITTEE OF MATERIALS SCIENCE
SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY OF GLIWICE
INSTITUTE OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
ASSOCIATION OF ALUMNI OF SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Conference
Proceedings

12th INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE

ACHIEVEMENTS IN MECHANICAL & MATERIALS ENGINEERING

Próba wykorzystania syntezy stopów do oceny korozji tworzyw na bazie Al i Mg

A. Białobrzęski, E. Czekaj

Instytut Odlewnictwa w Krakowie

Celem niniejszej publikacji jest pokazanie teoretycznych założeń doboru składu chemicznego (syntezy) stopów na bazie aluminium i magnezu, z uwzględnieniem specyficznych wymagań dotyczących odporności na korozję.

Skrótko omówiono dotychczasowy stan zagadnienia związany ze zjawiskami korozji tworzyw metalicznych. Przedstawiono – na przykładzie stopów magnezu – ideę szczególnej syntezy stopów z uwagi na specyficzne wymagania związane z odpornością na korozję.

Prezentowane koncepcje mogą być z powodzeniem przeniesione na tworzywa metalowe o innych osnowach.

1. WPROWADZENIE

W ostatnim okresie czasu obserwujemy na świecie znaczny wzrost produkcji odlewów z lekkich metali nieżelaznych takich jak: aluminium oraz – szczególnie – magnez. Jest to związane nie tylko ze wzrostem zapotrzebowania na lekkie części konstrukcyjne przez przemysł samochodowy czy lotniczy, ale także ze strony wytwórców różnorodnego przenośnego sprzętu AGD, RTV, kamer video, telefonów komórkowych i innych.

Stały wzrost produkcji odlewów aluminium i magnezu następuje dzięki opanowaniu na szeroką skalę metalurgicznych procesów otrzymywania czystych metali, opracowaniu technologicznych sposobów wytwarzania z nich różnorodnych stopów oraz rozwiązanie problemów natury ekologicznej przy ich przetopie i zalewaniu do form odlewniczych. Dynamiczny wzrost wytwarzania odlewów magnezowych – szczególnie w ostatnim okresie czasu – przypisuje się między innymi rozwiązaniu problemów korozyjnych, poprzez uzyskanie stopów na bazie Mg o wysokiej chemicznej czystości - tj. znacznego ograniczenia w nich szkodliwych, w tym względnie, zanieczyszczeń [1].

W Instytucie Odlewnictwa w Krakowie od lat wykorzystywane są metody ogólnej syntezy stopów [2,3] do opracowania nowych tworzyw odlewniczych oraz ulepszenia istniejących. W ostatnim okresie rozwijane są koncepcje syntezy ze względu na szczególne, specyficzne właściwości stopów takie jak: szeroko rozumiana stabilność wymiarowa (tj. zdolność do minimalnych odwracalnych i nieodwracalnych odkształceń w warunkach eksploatacji), zdolność do pracy w podwyższonych temperaturach czy właściwości trybologiczne. Poniżej przedstawimy ideę szczególnej syntezy stopów ze względu na odporność korozyjną.

2. ZJAWISKA KOROZYJNE W STOPACH METALICZNYCH

Korozję (*łac. corrodere* - wyżeranie, zżeranie, itp.) można określić jako niepożądane uszkodzenie materiału na skutek chemicznego (korozja chemiczna) i elektrochemicznego (korozja elektrochemiczna) oddziaływania środowiska zewnętrznego lub niszczenie tworzywa na skutek innych nie mechanicznych oddziaływań [4-6]. Korozja działa nierzadko z innym rodzajami niszczenia metali, powodując zwielokrotniony – synergiczny – efekt powstawania stanów awaryjnych części konstrukcyjnych.

Straty związane z korozją oraz nakłady ponoszone na ochronę antykorozyjną sięgają w świecie wielu setek miliardów dolarów [7]. Chociaż w ostatnim czasie osiągnięto znaczny postęp w zrozumieniu i opisanu tego typu niszczenia metali i stopów, to wiele jeszcze należy w tym kierunku zrobić [8].

2.1. Korozja chemiczna

Korozja chemiczna – to rodzaj niszczenia materiałów zachodzącego pod wpływem otoczenia, nie powodowanego powstawaniem prądu elektrycznego. Powstaje on na przykład wskutek oddziaływania metali z gazami oraz ciekłymi nie-elektrolitami. Obecność jednak w ciekłych nie-elektrolitach wilgoci zmienia charakter procesów korozyjnych z chemicznych na elektrochemiczny.

Główną przyczyną chemicznej korozji metali i stopów jest termodynamiczna niestabilność osnowy, poszczególnych składników stopowych oraz zanieczyszczeń w stosunku do tlenu, wodoru, azotu, chloru, siarki, węgla i innych pierwiastków. Naturalnym bowiem dla większości metali (w tym aluminium i magnezu) stanem równowagi trwałej są związki chemiczne, głównie z tlenem i siarką, charakterystyczne dla rud kopalnych. Najbardziej znanym w metalurgii przypadkiem korozji gazowej jest proces oddziaływania metalu z tlenem, wg poniższej ogólnej reakcji (1):



Termodynamika daje nam informacje o możliwości samoczynnego zachodzenia procesów tworzenia tlenków, siarczków, węglików, azotków, chlorków itp. w danych warunkach zewnętrznych. Stabilność termodynamiczna danego związku chemicznego określana jest znakiem i wielkością entalpii swobodnej (energii swobodnej Gibbsa) ΔG , przy jego tworzeniu z prostych (czystych) substancji. W metalurgii, a zatem w odlewnictwie stopień powinowactwa do tlenu czy siarki został po raz pierwszy określony na wykresach przez Ellinghama, w układzie *standardowy potencjał termodynamiczny (standardowa entalpia swobodna) reakcji – temperatura* [9,10]. Im niżej na wykresie leży krzywa odpowiadająca danemu pierwiastkowi (metalowi), tj. czym większą wartość ujemną ma standardowy potencjał termodynamiczny reakcji tworzenia jego tlenku, tym większe jest jego powinowactwo do tlenu [9]. Analogicznie jest w przypadku innych pierwiastków mogących wywoływać chemiczną korozję.

Aluminium i magnez należą – z punktu widzenia termodynamiki – do stosunkowo aktywnych pierwiastków, które pod wpływem różnorodnych fizyko-chemicznych i biologicznych czynników ulegają niszczeniu; przy tym ogólnie magnez jest pierwiastkiem bardziej aktywnym niż aluminium. Pomimo dużej aktywności chemicznej zarówno magnez jak i aluminium (a także stopy na ich osnowie) w normalnych warunkach atmosferycznych zachowują jednak stosunkowo dużą odporność na korozję. Dzieje się tak za sprawą

powstawania na ich powierzchni cienkich powłok tlenkowych chroniących metal przed dalszym utlenieniem. O ile powłoka na aluminium jest szczelna, to powłoka na magnezie jest bardziej porowata, stąd większa skłonność Mg do korozji tlenowej.

Aluminium oraz większość jego stopów posiada wysoką odporność na korozję w warunkach naturalnej atmosfery, wodzie morskiej, roztworach wielu soli i związków chemicznych oraz przeważającej części produktów żywnościowych [11]. Powszechnie znane jest natomiast agresywne działanie niektórych związków alkalicznych, takich na przykład jak NaOH, KOH i in.

Magnez i jego stopy mają dobrą odporność korozyjną w zwykłych warunkach atmosferycznych; charakteryzuje je także stabilność przy oddziaływaniu nań odczynów alkalicznych, chromianowych i wodoro-fluorowych kwasów, a także większości organicznych związków chemicznych, włączając w to węglowodory, aldehydy, alkohole (z wyjątkiem metylowego), fenole, amina, estry i większość olejów [7].

Charakter chemicznej korozji ma decydujący wpływ na dobór tej czy innej osnowy tworzywa konstrukcyjnego. Dla istniejącej grupy stopów czy zdeterminowanej innymi czynnikami osnowy nowo opracowywanych tworzyw, decydujące znaczenie będzie miała korozja natury elektrochemicznej. Tego typu korozji jest poświęcona głównie dalsza część artykułu.

2.2. Korozja elektrochemiczna

Jeżeli kawałek czystego metalu (np. aluminium czy magnezu) zanurzymy do roztworu elektrolitu, zawierającego jego jony Me^{n+} , to na powierzchni metalu (elektrodzie) będą zachodzić - do momentu powstania równowagi - reakcje, zgodnie z zależnością (2) :



Reakcje powyższe prowadzą do powstania na powierzchni elektrody warstwy elektrycznej podwójnej, powodującej wytworzenie się potencjału galwanicznego φ , różnego od potencjału galwanicznego roztworu. Układ jaki tworzy pojedyncza elektroda – wraz z roztworem elektrolitu, w którym jest zanurzona – nazywamy półogniwem.

W stanie równowagi istnieje związek pomiędzy potencjałem galwanicznym elektrody φ , a aktywnością jonów metalu w roztworze elektrolitu, określany równaniem Nernsta (3) [4, 12]:

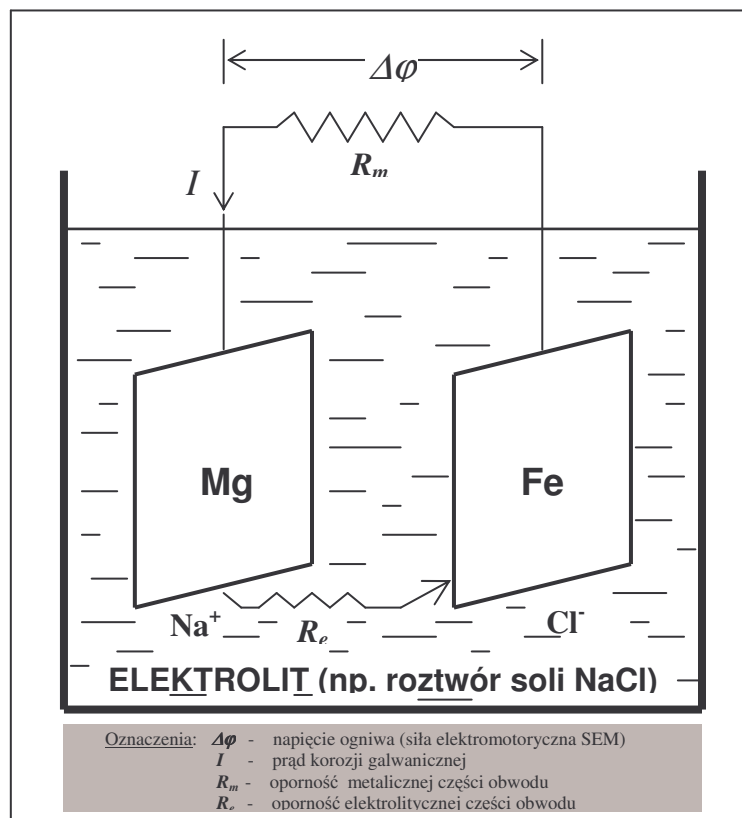
$$\varphi = \varphi^0 + \frac{RT}{nF} \ln a_{Me^{n+}} = \varphi^0 + 0,0001983 \cdot \frac{T}{n} \lg a_{Me^{n+}} , \quad (3)$$

gdzie: φ^0 - standardowa siła elektromotoryczna (standardowy potencjał elektrodowy) metalu; R - stała gazowa; T - temperatura bezwzględna, n - stopień utlenienia jonu metalu, F - stała Faraday'a, a - aktywność jonów metalu.

W elektrochemii za wielkość standardowej siły elektrochemicznej (standardowego potencjału elektrodowego) przyjmuje się wartość napięcia powstającego w obwodzie układu „elektroda wodorowa” — metal, zanurzonego – warunkach normalnych (temperaturze 298 K oraz ciśnieniu 1 atm.) – w roztworze własnej soli z aktywnością jonów metalu równą jedności. Zdecydowano się przyjąć potencjał rozkładu jonów wodoru H^+ w takich roztworach, jako punkt zerowy danej (standardowej) skali potencjałów. Uporządkowane w sposób rosnący standardowe potencjały dla większości przewodników elektrycznych (tj. głównie metali, a także niektórych związków chemicznych) tworzą tzw. szereg napięciowy (patrz rys. 4). Szereg ten pozwala w pierwszym przybliżeniu przewidzieć, który pierwiastek w utworzonym

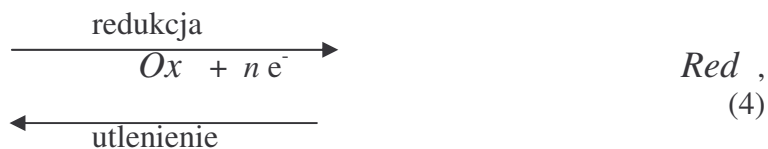
ogniwie galwanicznym będzie chroniony (ten którego potencjał jest wyższy), a który skazany na rozpuszczanie [8].

Jeżeli dwa różne metale (przewodniki) zanurzymy w roztworze elektrolitu, to taki układ dwóch elektrod nazywamy ogniwem galwanicznym (patrz rys.1). Ogniwo galwaniczne jest urządzeniem, w którym samorzutny przebieg reakcji chemicznej wytwarza prąd elektryczny [12].



Rys.1. Elementy ogniwa galwanicznego na przykładzie dwóch metali: Mg i Fe (typowy podwójny układ korozyjny w stopach magnezu) [1]

Cechą charakterystyczną korozji elektrolitycznej – w odróżnieniu od korozji chemicznej – jest więc przepływ prądu elektrycznego I . W wyniku tego przepływu na obydwu przewodnikach (elektrodach) zanurzonych w elektrolicie zachodzą elektrochemiczne reakcje typu *redox*, związane z oddawaniem lub przyjmowaniem elektronów, które w uogólnionej formie można przedstawić następująco (4) [4]:



gdzie: *Red* – reduktor (donor elektronów); *Ox* – utleniacz (akceptor elektronów); n – ilość elektronów (e^-) biorących udział w reakcji.

Reakcje utleniania zachodzą na elektrodzie zwaną anodą, z drugiej strony katodowe reakcje redukcji – mają miejsce na katodzie.

W wyniku zamknięcia obwodu ogniwa galwanicznego przepływający w nim prąd I korozji elektrochemicznej, zgodnie z prawem Oma, można wyrazić zależnością (5):

$$I = \frac{\Delta\varphi}{R} = \frac{\varphi_k - \varphi_a}{R}, \quad (5)$$

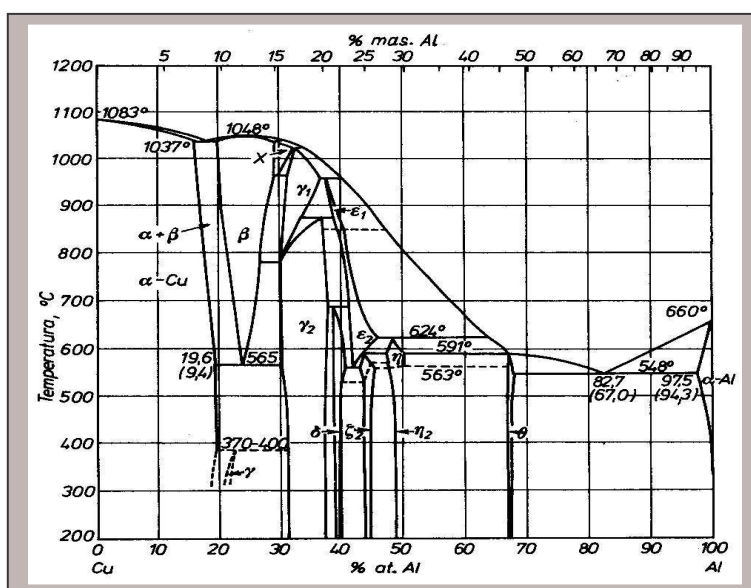
gdzie: φ_k i φ_a - początkowe potencjały (do zamknięcia obwodu) odpowiednio katody i anody; R - opór układu.

Różnica potencjałów $\Delta\varphi$ (lub inaczej SEM, E - siła elektromotoryczna lub napięcie w warunkach bezprądowych ogniwa) pomiędzy różnorodnymi metalami wytwarza prąd elektryczny przechodzący przez elektrolit, który doprowadza do korozji w pierwszej kolejności anody lub mniej szlachetny metal z danej pary. Im większa jest siła tego prądu, tym intensywniej (szybciej) zachodzi reakcja elektrochemicznej korozji. Dla stałych warunków korozyjnych (określonego elektrolitu i jego termodynamicznych parametrów) intensywność procesu korozyjnego będzie funkcją różnicy potencjałów. Znaczący to, że im dalej pomiędzy sobą stoją w szeregu napięciowym metale dla tym intensywniej - w danych warunkach - będą przebiegać procesy elektrochemicznej korozji.

Powyższe ogólnoteoretyczne rozważania z zakresu elektrochemii nie mogą być jednak w sposób prosty przełożone na metale i stopy metali.

Odnosnie czystych metali należy stwierdzić, iż podawane w literaturze wielkości ich standardowych potencjałów elektrochemicznych - jako kryteriów termodynamicznej stabilności - nie determinują do końca prędkości realnego procesu korozji, albowiem metal niestabilny w jednych warunkach, może okazać się trwałym - w innych [13].

W przypadku metalicznych stopów, i ich najprostszymi przedstawicielami w postaci układów podwójnych, należy postawić zasadnicze pytanie: czy dostateczna różnica potencjałów pomiędzy osnową i podstawowym składnikiem stopowym stanowi wystarczający, istotny czynnik występowania elektrochemicznej korozji danego tworzywa metalicznego? Odpowiedzi na powyższe pytanie może dać bliższe rozpatrzenie podwójnego układu Cu - Al (czy Al - Cu, rys. 2), spektakularnego dla rozpatrywanego przez nas zagadnienia.



Rys. 2. Układ równowagi Cu - Al (Al - Cu) [10]

Z punktu widzenia elektrochemii układ z rysunku 2 należy do wyraźnie niestabilnego z uwagi na stosunkowo dużą różnicę standardowych potencjałów elektrodowych $\phi_{Cu^+}^0 \cong +0,337$ ($\phi_{Cu^{2+}}^0 \cong +0,521$) i $\phi_{Mg^{2+}}^0 \cong -2,370$ V, tj.:

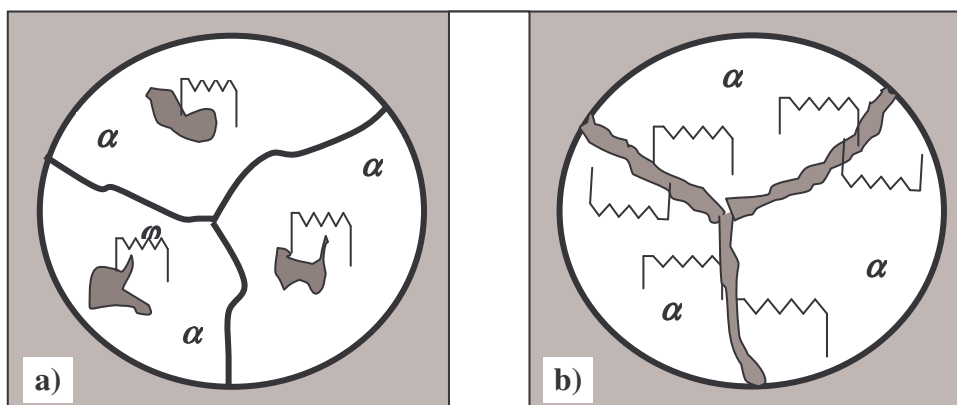
$$\Delta\phi = \phi_{Cu^+}^0 (\phi_{Cu^{2+}}^0) - \phi_{Mg^{2+}}^0 = +0,337 (0,521) - (-2,370) \cong 2,707 (2,891), V.$$

Tymczasem z metaloznawczej literatury powszechnie wiadomo, iż brązy aluminiowe (stopy układu Cu – Al) należą raczej do odpornych na korozję; stosowane są m.in. na śruby okrętowe statków morskich. Typowe brązy aluminiowe to w zasadzie stopy jednofazowe [14]. W pewnych elektrolitach niektóre brązy aluminiowe ulegają jednak tak zwanemu „od-aluminiowaniu”, tworząc porowaty (w postaci gąbki) materiał [8], co może wskazywać na istnienie w nich – poza roztworem stałym α_{Cu} – faz międzymetalicznych.

Jednocześnie aluminiowe stopy układu Al - Cu – z większymi zawartościami miedzi, tzw. *durale* – uważane są za mało odporne na korozję. W antykorozyjnych stopach aluminium ogranicza się zazwyczaj zawartość Cu do poziomu 0,05 ... 0,1 % wagowych. Niską odporność korozyjną tych stopów tłumaczy się powstawaniem w ich strukturze mikro-ogniów w układzie roztwór stały – faza międzymetaliczna typu θ (CuAl₂).

Zdolność do tworzenia stopów o jednorodnej lub wielofazowej strukturze związana jest głównie z rozpuszczalnością danej domieszki w osnowie w temperaturze topnienia oraz stanie stałym. O ile maksymalna rozpuszczalność aluminium w miedzi w podwyższonych temperaturach sięga 16,0 % at. i jest duża w niższych temperaturach, to analogiczna rozpuszczalność miedzi w aluminium - w temperaturze topnienia (548 °C) - wynosi tylko 2,5 % at. i praktycznie maleje do zera poniżej 400 °C (rys. 2). Innym przykładem, potwierdzającym prowadzone powyżej wywody, może być układ Al – Mg. Magnez w szeregu elektrochemicznym leży blisko aluminium ($\Delta\phi = \phi_{Al^{3+}}^0 - \phi_{Mg^{2+}}^0 = -1,66 - (-2,37) = 0,71$, V), a ponadto jego rozpuszczalność w aluminium jest duża (ok. 18,9 % at.); dlatego też większość wysokowytrzymałych i odpornych na korozję stopów układu Al – Mg o zawartości 5 ... 11 % wag. magnezu znajduje się w części wykresu równowagi odpowiadającej roztworowi stałemu α_{Al} , tj. tworzy struktury jednofazowe (jeżeli pominiemy obecność zanieczyszczeń na granicy ziaren) [15].

Z powyższych rozważań wynika, że w stopach metalicznych wpływ na intensywność korozji – oprócz czynników elektrochemicznej natury - będą miały parametry strukturalne. Jasnym staje się fakt, że warunkiem intensywnego występowania w stopach korozji o charakterze elektrochemicznym jest obecność w nich mikro-ogniów galwanicznych, które są następstwem występowania w mikrostrukturze stopu dwóch lub więcej faz. Podstawowymi elementami mikro-ogniów będą więc – oprócz osnowy – wtórne fazy wydzieleniowe czy też metaliczne (bądź międzymetaliczne) zanieczyszczenia, głównie na granicach ziaren. Ogólny schemat występowania mikro-ogniów galwanicznych w stopach metalowych przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Schemat międzyfazowej (selektywnej) a) i międzykrystalicznej b) korozji elektrochemicznej w stopach metalicznych

W literaturze specjalistycznej możemy znaleźć wielkości elektrodowych potencjałów nie tylko czystych metali, ale także roztworów stałych (o różnych stężeniach) oraz związków międzymetalicznych faz wydzieleniowych w roztworze stałym, jak i na granicach ziaren (np. [16]).

Oprócz wspomnianych wyżej czynników strukturalnych na intensywność elektrochemicznej korozji stopów metalicznych wpływają również czynniki energetyczne związane z wielkością ziaren (zwykle im mniejsze ziarno, tym mniejsza jest korozja [6], a także stanem wewnętrznymi naprężeń.

3. IDEA SYNTEZY STOPÓW METALOWYCH ODPORNYCH NA KOROZJĘ

Zgromadzony od początku do połowy XX w. materiał eksperymentalny, dotyczący głównie znanych do tego czasu ok. 10 000 stopów metalowych pozwolił na dokonanie w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ub. wieku pewnych uogólnień. Wynikiem ich było stworzenie podstaw syntezy stopów, odnoszącej się głównie do własności mechanicznych, a także niektórych technologicznych (odlewniczych) w temperaturze otoczenia. Koncepcje ogólnej syntezy stopów – na bazie fizyko-chemicznej i ekonomicznej analizy – obejmują: wybór osnowy stopów, selekcję głównych i wspomagających dodatków stopowych, identyfikację szkodliwych zanieczyszczeń [2,3]. Ostateczny wybór kompleksu dodatków stopowych dokonywany na drodze wykorzystania matematycznego modelowania i procedur optymalizacyjnych.

Wybór osnowy jest determinowany najczęściej względami konstrukcyjnymi; w innych przypadkach współcześnie może być kierunkowo dokonywany na bazie analizy wykresów doboru materiałów, zaproponowanych przez M.F. Ashby'go [17]. Wybór osnowy będzie – *a priori* – decydował głównie o chemicznej odporności stopu.

Na elektrochemiczny charakter korozji stopu, w świetle powyższych teoretycznych rozważań, będą miały wpływ trzy poniższe kryteria w układzie osnowa – domieszka (dodatek stopowy, zanieczyszczenie):

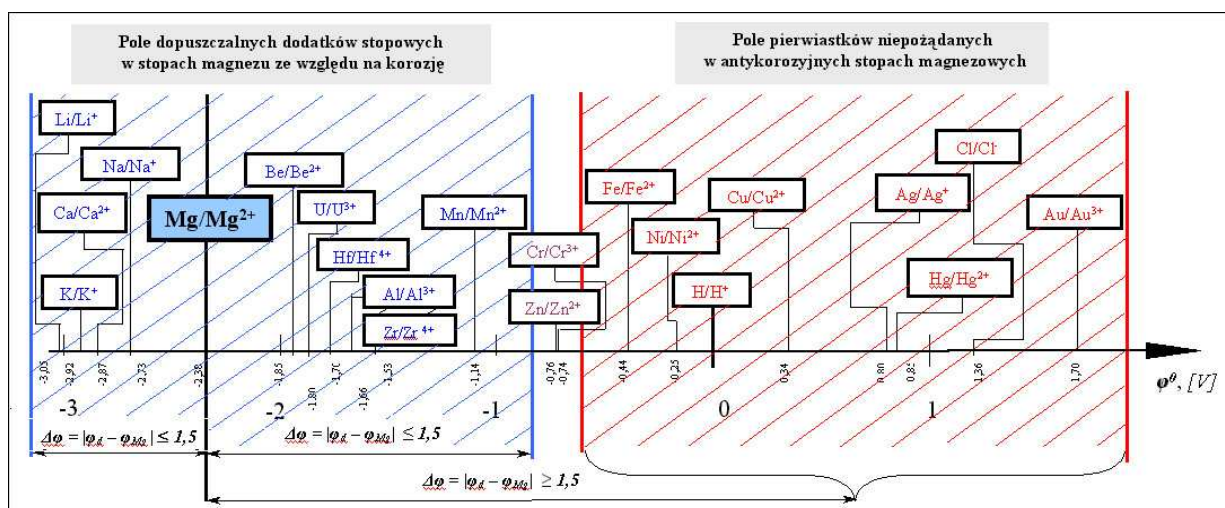
- kryterium różnicy standardowych potencjałów galwanicznych pomiędzy osnową i domieszką: $\Delta\varphi = \varphi_{osn.} - \varphi_{dom.}$;

- kryterium rozpuszczalności α , gdzie α – graniczna (maksymalna) rozpuszczalność pierwiastka w stanie stałym (w temperaturze przemiany fazowej: eutektycznej, perytektycznej czy monotektycznej);
- kryterium rozkładu domieszki w osnowie $\omega = \alpha / \beta$ (gdzie: α - jak wyżej, β – graniczna rozpuszczalność w stanie ciekłym).

Przyjmujemy, że w celu maksymalnej ochrony stopu przed korozją różnice pomiędzy standardowymi potencjałami galwanicznymi osnowy i domieszek (dodatków stopowych i zanieczyszczeń) nie powinny być większe od pewnej granicznej wartości $\Delta\phi_{gran.}$ (przyjętej dalej przez nas - czysto umownie - na poziomie 1,5 V, tj.:

$$\Delta\phi = |\phi_{osn.} - \phi_{dom}| \leq \Delta\phi_{gran.}$$

Schemat selekcji pierwiastków (dodatków stopowych i zanieczyszczeń), na przykładzie stopów magnezu, pokazuje poniższy rysunek 4.



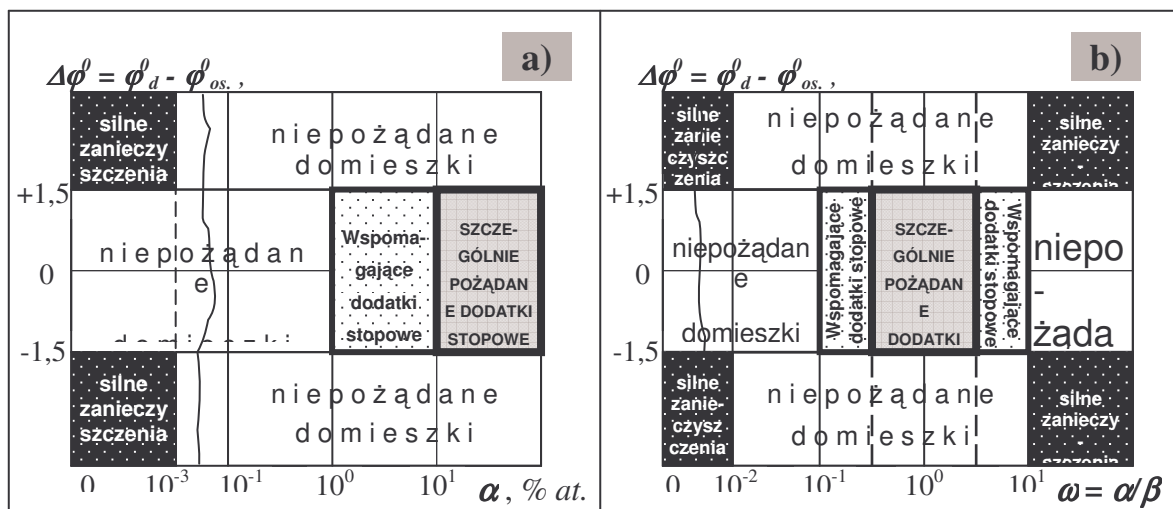
Rys. 4. Szereg napięciowy pierwiastków jako baza selekcji dodatków stopowych i zanieczyszczeń w stopach magnezu

Z punktu widzenia właściwości korozyjnych pożądanym jest, ażeby rozpuszczalność domieszki w stopie była maksymalna, to znaczy $\alpha \geq 1,0 \% at.$, czy jeszcze lepiej $\alpha \geq 10,0 \% at.$ Spełnienie ostatniego warunku przybliża otrzymywanie pożądanego jednorodnej (jednofazowej) struktury stopu. Stawiane tutaj wymagania doskonale pokrywają się z wymaganiami ogólnej syntezy stopów, tj. maksymalizacji rozpuszczalności domieszki z uwagi na własności wytrzymałościowe stopu.

Szczególnie niepożądane - tak z punktu widzenia wytrzymałości stopu (stopy antykorozyjne z reguły winny mieć określony poziom własności mechanicznych), jak i właściwości korozyjnych – jest nierównomierne rozmieszczenie w strukturze stopów zanieczyszczeń. Z niepożądanymi zjawiskami segregacji będziemy mieli do czynienia jeżeli wartości kryterium rozkładu będą znacznie różniły się od jedności. W przypadku $\omega \ll 1$ koncentracja domieszki następuje wzdłuż granicy ziarna, natomiast gdy $\omega \gg 1$ największe stężenie zanieczyszczenia występuje w centralnej części ziarna. Im bliżej wartość kryterium ω

jest równa jedności ($\omega \rightarrow 1$), tym bardziej jednorodny jest rozkład dodatku w strukturze stopu [2,3].

Na poniższym rysunku 5 pokazano schematy selekcji dodatków stopowych i zanieczyszczeń w układzie płaskim.



Rys. 5. Przykładowy schemat selekcji pierwiastków (podstawowych i wspomagających dodatków stopowych oraz zanieczyszczeń) z uwagi na właściwości korozyjne (gdzie: ϕ_d - elektrochemiczne potencjały domieszek stopu, ϕ_{os} - potencjał elektrochemiczny osnowy)

Dodatkowym kryterium ograniczającym wybór tych czy pierwiastków, jako dodatków stopowych dla stopów pracujących w warunkach korozji powinno być zazwyczaj kryterium cenowe.

Przy wykorzystaniu techniki komputerowej przeszukiwania i ich demonstracje graficzne można wykonywać w układzie 3D. Wyniki takich przeszukiwań będą przedmiotem kolejnych publikacji. Możemy jedynie zasygnalizować, iż w odniesieniu do stopów aluminium i magnezu wyniki selekcji dobrze pokrywają się z dotychczas znanymi danymi literaturowymi. Dalsze nasze analizy będą szły w kierunku opracowywania (syntezy) nowych antykorozyjnych stopów na bazie Mg i Al.

4. Wnioski końcowe

1. Wzrost zastosowań lekkich stopów na bazie aluminium i – głównie – magnezu zależą od rozwiązania w najbliższym czasie szeregu problemów natury korozyjnej.
2. Rozpatrywanie korozji stopów metalicznych na bazie tylko szeregów elektrochemicznych składników stopowych może prowadzić do błędnych wniosków. Należy powiązać te dane z analizą układów podwójnych osnowa – dodatek stopowy z punktu widzenia rozpuszczalności, tworzenia faz międzymetalicznych i zagadnień segregacyjnych.
3. Zaproponowana metodyka selekcji dodatków stopowych i zanieczyszczeń może stwarza możliwości syntezy jakościowo nowych stopów magnezu i aluminium, jak też ulepszyć istniejące. Koncepcje te mogą być wykorzystane do opracowania antykorozyjnych tworzyw na innych niż Al i Mg osnowach

LITERATURA

1. Birch J. Preventing corrosion of magnesium castings. *Diecasting World*, July 2001, p. 9-11.
2. Gulajev B.B. Sintiez splavov (Osnovnyje principy. Vybora komponentov). „Metallurgija”, Moskva, 1984.
3. Sobczak J. Podstawy syntezy stopów. Instytut Odlewnictwa, Kraków 1997.
4. Matsson E. Elektrokemi och korrosionslära. Bulletin nr 100. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1987 (wyd. ros. „Metallurgia 1991).
5. Sinjavskij V.S., Volkov V.D., Budov G.M., Korozja i zashchita aluminiyevych splavov. „Metalurgia”, Moskva 1979.
6. Sinjavskij V.S. i in. Korozja i zashchita aluminiyevych splavov. „Metalurgia”, Moskva, 1979.
7. Birchs. Collins J.A. Failure of Materials in Mechanical Design. Analysis, Prediction, Prevention. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley & Sons. New York · Chichester · Brisbane · Toronto · Singapore, 1981 (wyd. w j. rosyjskim, „Mir”, Moskva, 1984).
8. Sękowscy A. i S. Metale w naszym domu. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa, 1988.
9. Tyrkiel E. Termodynamiczne podstawy materiałoznawstwa. Państwowe Wydawnictwo naukowe, Warszawa 1987.
10. Górny Z. Odlewnicze stopy metali nieżelazne. Przygotowanie ciekłego metalu, struktura i właściwości odlewów. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1992.
11. ALUMINUM. Properties and Physical Metallurgy, Edited by John E. Hatch, American Society for Metals, 1984.
12. Atkins P.W. CHEMIA. Przewodnik po chemii fizycznej. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1997.
13. Zhukov A.P., Malahov A.I. Osnovy metaloviedienija i teorii korozji. “Vysshaja shkola”. Moskva, 1991.
14. Dobrzański A. Metaloznawstwo z podstawami nauki o materiałach. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
15. Magnesium and Magnesium Alloys. Edited by M.M. Avedesian and H. Baker. ASM International, 1999 r.
16. Postnikov N.S. Uprochnienije aluminiyevych splavov i otlivok. „Metalurgia”. Moskva, 1983.
17. Ashby M.F. Dobór materiałów – projektowanie inżynierskie. Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 1998.