

Василь ЛАРІН¹, Лілія ЄГОРОВА²

АНОДНЕ РОЗЧИНЕННЯ СПЛАВУ БрБ2 У РОЗЧИНАХ РІЗНИХ ЕЛЕКТРОЛІТІВ

¹ *НДІ хімії при Харківському національному університеті ім. В.Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, м. Харків, 61077. E-mail: lilyaegorova@ukr.net*

² *Харківський національний автомобільно-дорожній університет вул. Ярослава Мудрого, 25, к. 229, м. Харків, 61002*

Vasyl LARIN¹, Liliya EGOROVA²

ANODE DISSOLUTION OF Cu98Be ALLOY IN VARIOUS ELECTROLYTE SOLUTIONS

¹ *Research Institute of Chemistry at V.N. Karazin Kharkiv National University 4, Svobody sq., Kharkiv, 61077, Ukraine. E-mail: lilyaegorova@ukr.net*

² *Kharkiv National Automobile and Highway University 61002, Yaroslava Mudrogo st.25, Kharkiv, Ukraine*

ABSTRACT

Process of chemical dissolution of beryllium bronze in various electrolytes was studied. Ionization rate and selectivity of dissolution of Cu98Be alloy components, taking into account complex formation processes at chemical etching in solutions based on FeCl₃, was determined. It was shown that equable and high rated chemical dissolution of beryllium bronze is possible in acidic media in presence of Fe³⁺ ion-oxidizer and chlorine ions. Coefficients Z_{Be} и Z_{Cu} for beryllium bronze were calculated on the base of atomic-absorption analysis for solutions of copper and zinc ions concentrations that return into solution and by data of precise composition of Cu98Be alloy. To study an influence of inter ionic interactions in solution on ionization process of Cu98Be alloy, complex formation in the investigated solutions by distribution of complex particles by projection method was investigated. On the base of obtained data histograms of dependencies of fraction distribution of complex particles from acidity of etching solutions were built. Formation of complex particles in solution of 0,5 M FeCl₃ in various acidity was investigated.

It was shown that maximal formation of complex particles of the both alloys components is observed in the solution of composition 0,5 M FeCl₃ with quite high fraction of formation of FeCl₂²⁺ and FeCl₂⁺, what explain equable and high rated etching of the alloy Cu98Be in the solution of this composition and presented. Compositions of the solutions, which supply high rated and equable etching of Cu98Be alloy: 1) 0,5 M FeCl₃; 2) 0,5M FeCl₃ + 0,5M Fe(NO₃)₃ + 0,25M H₂SO₄; 3) 0,5M FeCl₃ + 0,5M Fe(NO₃)₃ + 0,5M HCl. Taking into account factors of simplicity and cheapness of the composition at high indexes of etching rate and uniform of dissolution of the both components of beryllium bronze Cu98Be as an optimal we proposed the composition □ 0,5 M FeCl₃. An optimal composition of etching solution was proposed – 0,5 M FeCl₃ is etching solution, which supply high rated, equable etch, caused by complex formation of copper as well as beryllium. The data obtained are important in practical use, because it let us to choose an optimal composition of the etching solution and enrich scientific database with information about etching of copper alloys.

KEY WORDS: *beryllium bronze, etching, selectivity of dissolution, complex particles.*

ВСТУП

Промислова політика усього світу призвела до незворотних і суттєвих змін у навколишньому середовищі, отже це питання (охорона навколишнього середовища на підприємстві) стало загальносвітовою проблемою і змусило державні апарати розробити довгострокову екологічну політику [1]. Найбільшої шкоди навколишньому середовищу завдається під час скидання у відкриті водойми промислових стічних вод металургійних заводів і підприємств радіоелектронної промисловості. Друковані плати є основними носіями

з'єднань в електроніці і від їх якості залежать основні характеристики електронних пристроїв [2]. На більшості виробництв електронної апаратури використовують фольгу з міді та її сплавів. Потреба у гнучких платах високої щільності підштовхує виробників мідної фольги до розробки оригінальних рішень, наприклад застосування мідно-берилієвих сплавів. Берилієву бронзу марки БрБ2 в основному використовують для виготовлення електронних пристроїв. Крім того, за механічною міцністю, зносостійкістю та корозійною тривкістю берилієву бронзу вважають одним із найліпших матеріалів для опор ковзання, а також для виготовлення опор і втулок шасі літаків та іншого устаткування і машин [3]. Саме завдяки унікальному поєднанню властивостей цей сплав є одним зі стандартних у виробництві електричних роз'ємів. Звичайно, під час механічної обробки необхідно добре контролювати виділення токсичного пилу, але цю проблему успішно вирішують під час розмірної обробки мідно-берилієвого сплаву операцією хімічного травлення [4].

ПРОБЛЕМА, ЇЇ ЗВ'ЯЗОК З НАУКОВИМИ І ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Труднощі, які виникають за анодної обробки поверхні мідних сплавів, потребують детального вивчення хімічного розчинення міді та її сплавів, в тому числі і берилієвих бронз у розчинах електролітів різного складу. Дані дослідження мають дуже велике значення в технології виробництва виробів точної механіки, оптики, радіоелектроніки та інших суміжних областях, де необхідно створення тонких і надтонких поверхневих структур, технології прецизійного травлення, нанесення малюнка, поєднання шарів тощо. Тверді двокомпонентні металеві розчини можуть брати участь у реакціях анодного окиснення таким чином, що іонізація стосується або двох компонентів, або вибірково одного з них. Як показано в праці [5], практичне здійснення механізмів розчинення гомогенних сплавів – рівномірного, псевдоселективного і селективного визначають ймовірністю утворення зародків нової фази на поверхні сплаву, який розчиняється, а також кінетичними параметрами реакцій іонізації і зворотного осадження іонів менш активного компонента. Вирішальну роль у фазоутворенні відіграє сполучення парціальних реакцій іонізації компонентів, тому, пригнічуючи його, можна впливати на схильність сплавів до селективного розчинення. При вивченні хімічного травлення двокомпонентних сплавів особливий інтерес із практичної точки зору представляє питання селективності розчинення компонентів. Селективне розчинення сплавів – ефективний спосіб отримання нанопоруватих матеріалів [6]. Вибіркового розчинення можна досягнути не тільки легуванням, а також введенням у розчин комплексоутворювачів і поверхнево-активних добавок. Отже, не менш важливим є дослідження хімічного розчинення мідних сплавів у розчинах різного складу з урахуванням процесів комплексоутворення, що дасть можливість оптимізувати технологічний процес травлення сплавів за рахунок підбору оптимального складу травильного розчину.

Мета: дослідження хімічного розчинення сплаву БрБ2 у розчинах на основі FeCl_3 з урахуванням процесів комплексоутворення та підбір складів травильних розчинів із оптимальними характеристиками.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Хімічне розчинення берилієвої бронзи БрБ2 досліджували такими експериментальними методами: гравіметричним, обертового дискового електроду (ОДЕ), атомно-абсорбційної спектроскопії.

Швидкість травлення визначали гравіметричним методом, застосувавши обертовий дисковий електрод (ОДЕ), виготовлений із бронзи марки БрБ2. Елементний склад сплаву БрБ2 визначено гравіметричним методом за ДОСТ 15027.13-77. Масова частка берилію у сплаві БрБ2 становила 1,78 %.

З метою вивчення впливу взаємодій між іонами у розчині на процес іонізації сплаву БрБ2 вивчали комплексоутворення у досліджуваних розчинах за допомогою розподілу комплексних частинок проекційним методом.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Здійснено експеримент по розчиненню сплаву БрБ2 у розчинах на основі FeCl_3 за високої швидкості обертань ОДЕ ($\omega=74 \text{ rot}\cdot\text{sec}^{-1}$), що дозволяє імітувати гідродинамічні умови

струминного травлення та зняти дифузійні обмеження щодо відведення продуктів розчинення мідної складової в об'єм розчину. Вибір складу травильних розчинів зумовлений їх практичним використанням у процесах травлення берилієвої бронзи.

Раніше для травлення берилієвої бронзи використовували кислий розчин на основі хлориду міді (II), основні недоліки якого низька швидкість травлення і бічне підтравлення. Крім того, утилізація такого розчину призводить до необхідності виділення великої кількості міді, що є проблемою, бо вимагається низьке значення її ГДК (гранично допустима концентрація) у стічних водах. Слід відзначити і високу вартість солей міді. З цих причин використовують дешевший травильний розчин, що має вищу швидкість травлення. До таких травильних розчинів відноситься склад на основі FeCl_3 [7].

На підставі результатів первинних досліджень по визначенню швидкості іонізації сплаву можна стверджувати, що розчинення сплаву БрБ2 в розчинах FeCl_3 значно вище, ніж в інших досліджуваних розчинах травлення. Це зумовлено високою окиснюваною здатністю Fe^{3+} . Високої швидкості розчинення берилієвої бронзи можна досягти не тільки підвищенням концентрації іона-окиснювача Fe^{3+} , а і введенням різних додатків, які утворюють стійкі комплекси з компонентами сплаву. Додатками до БрБ2 у різних електролітах за основний склад травильного розчину обраний розчин FeCl_3 основного електроліту були обрані KNO_3 , $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$. Підбір складу травильних розчинів здійснювали на основі аналізу літературних даних щодо комплексоутворення берилію і міді [8–11]. В якості третьої речовини були введені HCl , H_2SO_4 , HNO_3 , які знижують рН розчину для збільшення розчинення берилію. На підставі аналізу значення швидкості розчинення сплаву БрБ2 (табл. 1) обрано низку складів травильних розчинів із високою швидкістю іонізації сплаву, в яких досліджено селективність розчинення компонентів берилієвої бронзи (табл. 1). Коефіцієнти селективності по компонентах сплаву розраховано на підставі результатів атомно-абсорбційної спектрометрії.

Високошвидкісне та рівномірне розчинення сплаву спостерігали в розчинах складу 1, 7 і 8 (табл. 1). Швидкість розчинення БрБ2 у розчині $0,5 \text{ M FeCl}_3 + 1,5 \text{ M KNO}_3 + 0,5 \text{ M HCl}$ у декілька вища, ніж швидкість травлення у розчинах $0,5 \text{ M FeCl}_3$ і $0,5 \text{ M FeCl}_3 + 0,5 \text{ M Fe}(\text{NO}_3)_3 + 0,25 \text{ M H}_2\text{SO}_4$. Це можна пояснити тим, що розчинення мідної компоненти забезпечується взаємодією з іонами окиснювача Fe^{3+} і утворенням хлоридних комплексів $\text{Cu}(\text{I})$, але по мірі виснаження травильного розчину їх концентрація зменшується, і розчинення сповільнюватиметься [8]. Отже, хлоридна добавка необхідна для підтримки розчинення мідної компоненти, в якості якої було застосовано HCl . Найвища швидкість травлення БрБ2 у розчині з хлоридною кислотою. Для берилію основним чинником, що забезпечує розчинення, є кислотність розчинів, яку також підтримує додаток HCl .

Таблиця 1. Результати дослідження швидкості і селективності розчинення берилієвої бронзи у розчинах на основі FeCl_3 (час травлення – 20 хв., $\omega=74 \text{ об}\cdot\text{с}^{-1}$)

Table 1. Results of investigation of rate and selectivity of dissolution of beryllium bronze in the solutions, based on FeCl_3 (time of etching-20 min, $\omega=74 \text{ rot}\cdot\text{sec}^{-1}$)

№	Склад розчину, mol/l	$V \cdot 10^{-3}$, kg/m ² ·sec	Вміст іонів, g/l		Коефіцієнти селективності компонентів сплаву	
			Be^{2+}	Cu^{2+}	Z_{Be}	Z_{Cu}
1	0,5 M FeCl_3	1,61	0,0964	5,04	0,95	1,1
2	0,75 M FeCl_3	2,1	0,0544	3,71	0,7	1,39
3	1,0 M FeCl_3	2,6	0,0915	5,57	0,8	1,24
4	0,5M $\text{FeCl}_3 + 1,5\text{M KNO}_3$	1,67	0,047	4,7	0,5	2,04
5	0,5M $\text{FeCl}_3 + 1,5\text{M KNO}_3 + 0,5\text{M HCl}$	1,97	0,0413	3,53	0,6	1,7
6	0,5M $\text{FeCl}_3 + 0,5\text{M Fe}(\text{NO}_3)_3$	2,17	0,0628	3,86	0,81	1,25
7	0,5M $\text{FeCl}_3 + 0,5\text{M Fe}(\text{NO}_3)_3 + 0,25\text{M H}_2\text{SO}_4$	1,84	0,0459	2,27	1,0	1,0
8	0,5M $\text{FeCl}_3 + 0,5\text{M Fe}(\text{NO}_3)_3 + 0,5\text{M HCl}$	2,4	0,0625	3,45	0,9	1,1
9	0,5M $\text{FeCl}_3 + 0,5\text{M Fe}(\text{NO}_3)_3 + 0,5\text{M HNO}_3$	2,26	0,06948	4,27	0,8	1,25

Розглянувши співвідношення коефіцієнтів селективності компонентів сплаву (табл.1) видно, що вибіркоче розчинення по мідній компоненті сплаву БрБ2 відбувається в розчинах

складу: 0,5 М FeCl₃ + 1,5 М KNO₃ + 0,5 М HCl;
0,5 М FeCl₃ + 1,5 М KNO₃.

Швидкість травлення залежить від концентрації іонів міді в розчині. За занадто малого та занадто великого вмісту іонів міді в розчині відбувається різка зміна швидкості травлення. Як видно з гістограми (рис. 1), залежності швидкості розчинення сплаву БрБ2 від змісту Cu²⁺(g/l), у розчині після травлення найбільші і найменші значення швидкості іонізації берилієвої бронзи за достатньо великого вмісту іонів міді(II) у розчинах № 2 і 8.

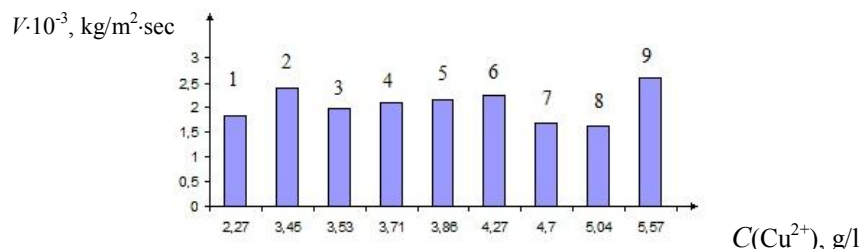


Рис. 1. Гістограма залежності швидкості розчинення ($\tau = 20$ хв) сплаву БрБ2 від концентрації іонів міді у розчинах складу: 1 – 0,5М FeCl₃ + 0,5М Fe(NO₃)₃ + 0,25М H₂SO₄; 2 – 0,5М FeCl₃ + 0,5М Fe(NO₃)₃ + 0,5М HCl; 3 – 0,5М FeCl₃ + 1,5М KNO₃ + 0,5М HCl; 4 – 0,75 М FeCl₃; 5 – 0,5М FeCl₃ + 0,5М Fe(NO₃)₃; 6 – 0,5М FeCl₃ + 0,5М Fe(NO₃)₃ + 0,5М HNO₃; 7 – 0,5М FeCl₃ + 1,5М KNO₃; 8 – 0,5 М FeCl₃; 9 – 1,0 М FeCl₃.

Fig. 1. Histogram of dependence of dissolution rate ($\tau = 20$ min) of Cu98Be alloy from copper ions concentration in the solution of composition: 1 – 0,5M FeCl₃ + 0,5M Fe(NO₃)₃ + 0,25M H₂SO₄; 2 – 0,5M FeCl₃ + 0,5M Fe(NO₃)₃ + 0,5M HCl; 3 – 0,5M FeCl₃ + 1,5M KNO₃ + 0,5M HCl; 4 – 0,75 M FeCl₃; 5 – 0,5M FeCl₃ + 0,5M Fe(NO₃)₃; 6 – 0,5M FeCl₃ + 0,5M Fe(NO₃)₃ + 0,5M HNO₃; 7 – 0,5M FeCl₃ + 1,5M KNO₃; 8 – 0,5 M FeCl₃; 9 – 1,0 M FeCl₃.

Можна виділити два чинники, які сприяють збільшенню швидкості розчинення сплаву БрБ2: збільшення концентрації лігандів (Cl⁻) для утворення комплексів іонів міді і збільшення концентрації іонів-окиснювачів (Fe³⁺). Для розчинення другого компонента сплаву Be дуже важливим чинником є зниження кислотності середовища. На підставі цього подальші дослідження виконували у розчинах на основі 0,5 М FeCl₃ (даний склад однокомпонентний, але забезпечує рівномірне травлення і з досить високою швидкістю, див. табл.1) з додатком HCl різної концентрації (табл. 2).

Таблиця 2. Результати дослідження швидкості іонізації сплаву БрБ2 і селективності розчинення компонентів сплаву в розчинах на основі 0,5 М FeCl₃

Table 2. The results of investigation of ionization rate of Cu98Be alloy and selectivity of dissolution of the alloy components in solutions based on 0,5 M FeCl₃

№	Склад розчину, mol/l	V · 10 ⁻³ , kg/m ² · sec	Концентрація Cu ²⁺ , g/l	Концентрація Be ²⁺ , g/l	Коефіцієнти селективності компонентів сплаву БрБ2	
					Z _{Cu²⁺}	Z _{Be²⁺}
1	0,5 М FeCl ₃	1,61	5,04	0,0964	1,06	0,95
2	0,5 М FeCl ₃ + 0,1М HCl	1,5	1,945	0,0316	1,26	0,8
3	0,5 М FeCl ₃ + 0,25М HCl	1,6	2,16	0,0386	1,14	0,894
4	0,5 М FeCl ₃ + 0,5М HCl	1,75	2,3	0,0402	1,17	0,87
5	0,5 М FeCl ₃ + 0,75М HCl	1,7	2,2	0,0394	1,14	0,895

Як видно із результатів визначення швидкості травлення берилієвої бронзи, її значення несуттєво відрізняються в усіх досліджуваних розчинах, а коефіцієнти селективності розчинення компонентів сплаву найбільш близькі в розчині складу 0,5 М FeCl₃, що свідчить про рівномірне травлення. Отже, даний склад розчину забезпечує не тільки високу швидкість, але і рівномірність травлення берилієвої бронзи.

З метою вивчення впливу взаємодії між іонами у розчині на процес іонізації сплаву БрБ2 вивчали комплексоутворення у досліджуваних розчинах за допомогою розподілу

комплексних частинок проєкційним методом. Концентрації комплексних частинок розраховували програмою [12] з точністю до 10^{-24} . Значення констант стійкості комплексів при $I = 1,0$ М взяті з праці [13].

Незначне зростання швидкості розчинення сплаву БрБ2 (див. табл. 2) можна пояснити утворенням у розчині комплексів заліза(III), які активують розчинення мідної складової сплаву. Як видно з рис. 2, комплексоутворення у досліджуваних розчинах незначне.

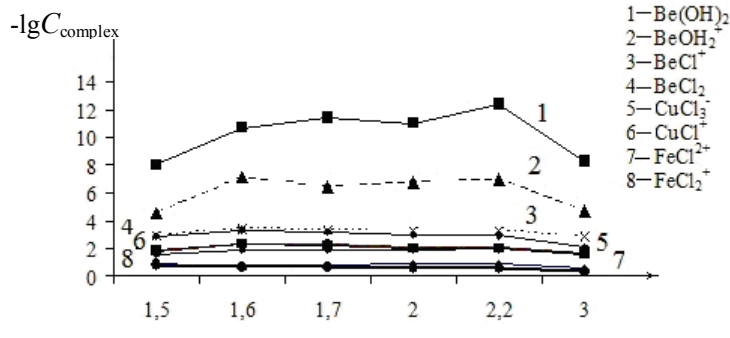


Рис. 2. Діаграма розподілу комплексних часток у системі $0,5\text{M FeCl}_3 + n \text{HCl}$: 1 – $\text{Be}(\text{OH})_2$; 2 – BeOH_2^+ ; 3 – BeCl^+ ; 4 – BeCl_2 ; 5 – CuCl_3^- ; 6 – CuCl^+ ; 7 – FeCl_2^{2+} ; 8 – FeCl_2^+ .

Fig. 2. Diagram of distribution of complex particles in the system $0,5\text{M FeCl}_3 + n \text{HCl}$: 1 – $\text{Be}(\text{OH})_2$; 2 – BeOH_2^+ ; 3 – BeCl^+ ; 4 – BeCl_2 ; 5 – CuCl_3^- ; 6 – CuCl^+ ; 7 – FeCl_2^{2+} ; 8 – FeCl_2^+ .

Екстремумів на діаграмах розподілу комплексних частинок немає, тому можна зробити висновок про активуючу дію будь-якої комплексної частинки на іонізацію сплаву БрБ2 у досліджуваних розчинах. Найбільш переважають тут комплексні частинки FeCl_2^{2+} і FeCl_2^+ . Це аквахлоридні комплекси, а для зручності написання молекули води опущені, хоча координаційне число $\text{Fe}(\text{III})$ дорівнює 6. Найстійкішими комплексами в розчинах хлориду заліза (III) є FeCl_2^+ , менш стабільні FeCl_2^{2+} і зовсім мала стійкість у нейтральних і аніонних комплексів, відповідно, FeCl_3 і FeCl_4^- .

Впливом мідно-хлоридних і берилієво-хлоридних комплексів на швидкість розчинення берилієвої бронзи можна знехтувати, так як вивчали початковий момент травлення тривалістю 20 min, упродовж якого іони міді та берилію накопичувалися в розчині в незначних концентраціях. У працях [14–15] показано, що різні хлоридні комплекси заліза(III) по-різному впливають на іонізацію міді. Запропоновано ряд активності комплексних частинок $\text{Fe}(\text{III})$, згідно з яким пришвидшення розчинення міді відбувається у присутності комплексів $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5\text{Cl}]^{2+}$ і, більшою мірою, $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4\text{Cl}_2]^+$. Однією з причин цього є збільшення константи швидкості обміну електроном у системі $\text{Fe}(\text{II})/\text{Fe}(\text{III})$ під час утворення даних комплексів. Тобто при утворенні комплексів іонів заліза(III) з Cl^- -іонами відбувається збільшення швидкості процесу на стадії передачі електрона від $\text{Cu}(\text{I})$ окиснювачем, яким у даному випадку є комплекс $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5\text{Cl}]^{2+}$ або $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4\text{Cl}_2]^+$. Авторами праць [16–17] показано, що зростання швидкості розчинення міді пов'язане зі стійким зростанням концентрації $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4\text{Cl}_2]^+$ на тлі повільного зменшення концентрації $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5\text{Cl}]^{2+}$ за збільшенні загальної концентрації іонів хлору.

На діаграмах розподілу рис. 2 можна відзначити загальні тенденції зміни концентрацій комплексних частинок у розчині при зростанні сумарної концентрації іонів хлору ($C(\text{Cl}^-)$). Вільні іони хлору можуть утворювати комплекси з іонами міді та берилію, які переходять у розчин, що важливо з позицій забезпечення рівномірності розчинення сплаву і достатньої ємності рідкої фази за двома компонентами сплаву БрБ2. Концентрація комплексів $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4\text{Cl}_2]^+$ більша, ніж концентрації інших комплексних частинок заліза(III). В інтервалі концентрацій Cl^- -іона 2,2...3 mol/l (рис. 2) спостерігали незначне підвищення концентрації всіх комплексних частинок досліджуваної системи, що відповідає складу травильного розчину з низьким значенням рН. Цей факт свідчить про те, що кислотність середовища сприяє утворенню всіх комплексних частинок берилію, навіть $\text{Be}(\text{OH})_2$ і BeOH_2^+ , концентрації яких значно менші, ніж хлоридних комплексів берилію.

ВИСНОВКИ

Вивчено процес хімічної іонізації сплаву БрБ2 у розчинах різного складу на основі FeCl_3 . Визначені швидкість травлення БрБ2 і селективність розчинення компонентів сплаву з урахуванням процесів комплексоутворення і кислотності середовища в розчинах на основі FeCl_3 . Високу швидкість травлення, рівномірність процесу розчинення і берилієвої, і мідної компонентів сплаву забезпечує наявність у складі травильного розчину іонів-окиснювача Fe^{3+} , іонів хлору та кисле середовище;

Обрані такі складі розчинів, які забезпечують високошвидкісне і рівномірне травлення сплаву БрБ2: 1) 0,5 М FeCl_3 ; 2) 0,5 М FeCl_3 + 0,5 М $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ + 0,25 М H_2SO_4 ; 3) 0,5 М FeCl_3 + 0,5 М $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ + 0,5 М HCl . З урахуванням факторів простоти і дешевизни складу при високих показниках швидкості травлення і рівномірності розчинення обох компонентів берилієвої бронзи БрБ2 в якості оптимального запропоновано склад 0,5 М FeCl_3 .

ЛІТЕРАТУРА

1. Болбас М. Основы промышленной экологии. – М.: Высшая школа, 1993. – С. 89.
2. Медведев А. Конструкции и принципы изготовления печатных плат // Технологии в электронной промышленности. – 2011 – № 4 – С. 12–18.
3. Тебякин А.В. Многофункциональные медные сплавы /А.В. Тебякин, А.Н. Фоканов, В.Ф. Подуражная // Труды ВИАМ – 2016 – № 12(48) – С. 37–44.
4. А. Медведев Материалы для гибких печатных плат / А. Медведев // Технологии в электронной промышленности. – 2011 – № 3 – С. 12–19.
5. Кондрашин В.Ю. Термодинамическая и кинетическая обусловленность механизмов анодного растворения интерметаллических фаз / В. Ю. Кондрашин, И.К. Маршаков // Вестник ВГУ. Серия химия, биология. – 2000 – С. 55–61.
6. Старченко В.Ю. Перколяционная модель процесса формирования нанопористых структур методом селективного растворения / В.Ю. Старченко, В.В. Зозуля, В.А.Прокопенко, Н.И.Лебовка // Наноструктурное материаловедение. – 2010 – № 1 – С. 39–41.
7. Качагин А. Создание комплекса изготовления пружинных деталей /А.Качагин, Н. Кривохижина, А.Савицкий, Н. Короткова / Производство электроники: технологии, обрудование, материалы – 2008 – № 5 – С. 41–46.
8. Химическое растворение меди и ее сплавов в растворах различного состава и оптимизация технологических процессов травления металлов: монография / [Э. Б. Хоботова, Ларин В. И., Егорова Л. М. и др.]. – Х.: ХНАДУ, 2008. – 223 с.
9. Теоретичні основи хімії рідкісних і розсіяних елементів: підручник / М.Д. Сахненко, М.В. Ведь, В.В. Штефан, М.М. Волобуєв; за ред. М.Д. Сахненка. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – 424 с.
10. Ардашникова Е.И Неорганические фториды / Е.И Ардашникова // Соросовский образовательный журнал. – 2000 – Т. 6, № 8 – С. 54–60.
11. Матясова В.Е. Получение, свойства и применение соединений бериллия высокой чистоты / В.Е. Матясова, М.Л. Коцарь // Вопросы атомной науки и техники. – 2014 – № 2(90) – С. 111–119.
12. Бугаевский А.А., Мухина Т.П. Методы расчета равновесного состава в системах с произвольным количеством реакций// Математика в химической термодинамике. – Новосибирск: Наука, 1980. – С. 20–36.
13. Sillen L.G., Martell A.E. Stability constants of metal – ion complexes. Supplement № 1. Inorganic ligands. – London, 1974. – 481 p.
14. Ayerst G.G. Ferric chloride as an etching material // Trans. Inst. Metal Finish. – 1966. – Vol. 44, № 1. – P. 176–178.
15. Kinetics of copper-ferric chloride reaction and the effects of certain inhibitors / W.H. Burrows, T.C. Lewis, D.E. Saire, R.E. Brooks. – Industr. Engng. Chem. Process. Design and Developm. – 1964. – Vol. 3, № 2. – P. 149 – 159.
16. Влияние хлорид-иона на растворение меди / В.И. Ларин, С.Д. Горобец, Э.Б.Хоботова, Н.И. Егоркин // Вестн. Харьк. ун-та. – 1989. - № 340. – С. 55 – 58.
17. Влияние межионных взаимодействий на скорость каталитического процесса растворения меди / В.И. Ларин, Э.Б.Хоботова, С.Д. Горобец, Д.Н. Грицан // Журн. прикл. химии. – 1990. – Т. 63, № 3. – С. 625–630.