

# CHEMICAL DISSOLUTION OF BERYLLIUM BRONZE AT PROPORTIONAL ETCHING IN VARIOUS ELECTROLYTES

Egorova L.<sup>1</sup>, Datcenko V.<sup>1</sup>, Larin V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Kharkiv National Automobile and Highway University*

*61002, Yaroslava Mudrogo st.25, Kharkiv, Ukraine*

<sup>2</sup> *Research Institute of Chemistry at V.N. Karazin Kharkiv National University*

*61077, Svobody sq.4, Kharkiv, Ukraine*

The process of chemical ionization of Cu98Be alloy in solutions of various composition based on FeCl<sub>3</sub> was investigated. On the base of our first investigations of determination of the ionization rate of Cu98Be alloy in various electrolytes, the solution of FeCl<sub>3</sub> was chosen as a basic component of etching solution. The series of five composition of etching solutions which provide high etching rate and uniform dissolution of beryllium bronze components was selected. With the aim of determination of beryllium bronze chemical dissolution selectivity, the etching process in ferric chloride solutions during the long period of time was studied. As the quantitative indexes of Cu98Be alloy etching evenness the coefficients of alloy components dissolution selectivity were determined. While the full etching solutions exhausting the low-soluble compounds were formed. The mineralogical composition of low-soluble compounds in exhausted etching solutions was determined by X-ray-phase analysis. The compounds of beryllium and copper (I) were absent in precipitate. The optimal compositions of etching solutions providing high-quality etching of beryllium bronze according to several criteria – high process speed, uniform dissolution of alloy components, high capacity for both components of beryllium bronze were proposed. The obtained results are of great importance in practical use because they allow selecting the composition of the etching solution, which in turn helps to optimize the technological etching process.

**Keywords:** beryllium bronze; etching; etching solution; dissolution selectivity; exhausting, mineralogical composition

## **ХІМІЧНЕ РОЗЧИНЕННЯ БЕРИЛІЄВОЇ БРОНЗИ ПРИ РОЗМІРНОМУ ТРАВЛЕННІ В РІЗНИХ ЕЛЕКТРОЛІТАХ**

Єгорова Л.<sup>1</sup>, Даценко В.<sup>1</sup>, Ларін В.<sup>2</sup>

*1–Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
61002, м.Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25*

*2 – НДІ хімії при ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 61077, м. Харків, пл. Свободи, 4*

Анодні процеси за участю металів і сплавів мають велике практичне значення для технологій обробки металів, гідрометалургії, радіоелектронної промисловості. Саме анодні процеси визначають корозійну стійкість металів і сплавів та істотно впливають на стабільність роботи пристроїв, що працюють за електрохімічним принципом. Друковані плати сьогодні – основа будь-якого електронного пристрою. Це і традиційно стандартні плати для вивідних компонентів, і сучасні високотехнологічні плати з великою щільністю малюнка: SMD (плати для поверхневого монтажу), PCMCIA (модемні плати для персональних комп'ютерів), Smart Cards (інтелектуальні картки з вбудованою логікою і мікропроцесором), мультичіпові модулі, гнучкі друковані плати, плати з оптичним інтерфейсом и т.п. [1-2]. Сучасне виробництво друкованих плат – це сукупність різних технологій, у тому числі і хімічних. У технологіях виробництва друкованих плат застосовується травлення міді та мідних сплавів. Наприклад, мідно-берилієві сплави, які мають високий опір втомі, міцність, пружність, електропровідність і корозійна стійкість. Завдяки вище приведеним властивостям, берилієві бронзи застосовуються для виготовлення пружних елементів відповідального призначення – плоских і кручених пружин, пружних елементів у вигляді гофрованих мембран, струмопровідних пружних деталей електроустаткування, пружних деталей електронних приладів і пристроїв, а також оптико-волоконном телекомунікаційному обладнанні, гніздових роз'ємах для з'єднання інтегральних схем з друкованою платою.

Найбільш застосовують високолеговані берилієві бронзи з вмістом берилію ~ 2%, такі як сплав марки БрБ2 або по зарубіжній специфікації 25 (С17200) [3]. Дуже важливо дотримуватися в цих технологіях мінімального пошкодження поверхневого шару берилієвої бронзи, тому для підготовки поверхні вибирають хімічний процес травлення [4-6].

Актуальним також залишається питання токсичності берилієвих технологій і тому, сьогодні ведуться експерименти по створенню мідних сплавів із середньою провідністю без вмісту Ве. Вони можуть бути виготовлені з широким спектром механічних властивостей, від високо-пластичних до надвисокої міцності, але недоліком є висока густина. Очевидно, що зниження густини в мідних сплавах за рахунок варіювання легуючих елементів дуже обмежені і навряд чи будуть вносити значний вклад в істотне збільшення питомої міцності.[7]. Отже берилієва бронза володіє унікальним набором фізико-механічних властивостей. Крім того, при механічній обробці БрБ2 необхідно добре контролювати виділення токсичного пилу, але і ця проблема успішно вирішується при розмірній обробці мідно-берилієвого сплаву операцією хімічного травлення. Встановлення закономірностей і стадійності процесів хімічного і електрохімічного розчинення металів і сплавів в розчинах, які традиційно застосовують, а також створення нових електролітних систем сприяють удосконаленню технологій, можливості управління технологічними процесами, визначенню режимів експлуатації виробів.

### ***Проблема, її зв'язок з науковими і практичними завданнями***

Аналіз літературних даних показав, що результати вивчення хімічного і анодного розчинення берилієвої бронзи в концентрованих водних середовищах практично відсутні. Питання селективного розчинення мідних сплавів, розглянуто у багатьох авторів [8-9]. Це обумовлено, перш за все, необхідністю захисту конструкційних матеріалів від селективної корозії, яка є причиною різкого і незворотного погіршення механічних властивостей металевих сплавів та призводить до їх повного руйнування. Поряд з негативними ефектами селективного розчинення сплавів активно вивчається можливість застосування

процесу вибіркового розчинення дво- і багатокomпонентних твердих розчинів для отримання високорозвинених, мікро- і нанопористих матеріалів [10]; найбільш відомим прикладом процесу є скелетний нікель, синтезований Рене на початку минулого століття. Застосування друкованих плат стало основою високовиробничого, економічного, повністю автоматизованого виробництва електронної апаратури. При виготовленні друкованих плат застосовують технологічну операцію травлення міді та мідних сплавів. [11].

При травленні мідних сплавів показниками якості є: проведення процесу з високою швидкістю, рівномірністю травлення в часі, рівномірністю по розчиненню компонентів сплаву, великою ємністю розчину по метало-іонам – компонентам сплаву. Крім того, розглядаючи процес травлення з хімічної точки зору, важливо враховувати залежність фактора підтравлювання від природи розчину травлення. Саме тому, основним експериментально-дослідницьким завданням стала розробка хімічних складів травильних розчинів, що поєднують в собі добрі показники мікро-травлення і забезпечують створення рівномірного мікрорельєфу з високою площею поверхні [12-13]. Залежно від цього необхідно підбирати склад травильного розчину.

**Мета:** вивчення хімічної іонізації сплаву БрБ2 в різних електролітах та оптимізація технологічного процесу травлення берилієвої бронзи за рахунок підбору складів травильних розчинів.

### **Методи дослідження**

Визначення швидкості хімічного травлення за допомогою гравіметричного методу ґрунтувалося на використанні дискового електроду, що обертається (ОДЕ), виготовленого із сплаву БрБ2, при  $\omega = 74 \text{ об} \cdot \text{с}^{-1}$ . Елементний склад сплаву БрБ2 визначено гравіметричним методом по ДОСТ 15027.13-77. Масова частка берилію в сплаві БрБ2 становить 1,78%. Для з'ясування стану матеріалу (сплав БрБ2), а саме загартований або зістарений було проведено визначення твердості сплаву БрБ2 по Бринеллю НВ на твердомірі UIT-NBW-1S за допомогою програми «Визначення твердості матеріалів втисненням сферичного індентора».

Було визначено, що твердість по Бринеллю  $HV = 284,3$  - що відповідає зістареному стану берилієвої бронзи [14]. Вміст іонів  $Be^{2+}$  та  $Cu^{2+}$  визначали методом атомно-абсорбційної спектрометрії, використовуючи спектрометр атомної абсорбції МРА-915 МД. Мінералогічний склад осадів малорозчинних сполук, що утворюються у виснажених травильних розчинах, визначали за допомогою рентгенофазового аналізу. Порошкові дифрактограми отримані на дифрактометрі «Siemens D500» (випромінювання  $CuK\alpha$  ( $\lambda = 1.54184\text{\AA}$ , графітовий монохроматор на вторинному пучку, геометрія Брегга-Брентано). Первинна ідентифікація фаз виконана по картотеці PDF-1, що входить в програмне забезпечення дифрактометра. Розрахунок рентгенограм зразків виконаний за методом Ритвельда, з використанням програми FullProf [15].

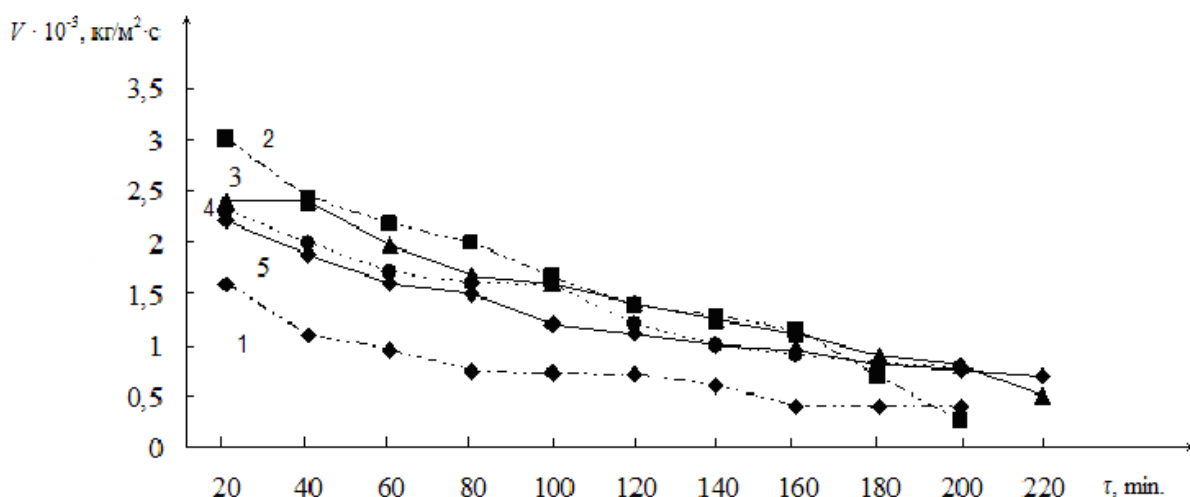
### ***Вивчення стабільності процесу хімічного травлення сплаву БрБ2 в часі***

За допомогою методу обертового дискового електрода (швидкість обертання 74 об / с) була проведена серія експериментів по вимірюванню швидкості розчинення берилієвої бронзи БрБ2 в розчинах різного складу та методом атомної абсорбції визначена селективність розчинення компонентів сплаву. На підставі отриманих даних були обрана серія з п'яти складів травильних розчинів, які забезпечують високу швидкість травлення і рівномірне розчинення компонентів берилієвої бронзи (табл.1):

**Таблиця 1.** Результати дослідження швидкості іонізації сплаву БрБ2 і селективності розчинення компонентів сплаву в досліджуваних розчинах (час травлення сплаву БрБ2 20 хв; 25°C)

	Склад розчину, моль/л	$V \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>2</sup> ·с	Вміст іонів, г/л		Коефіцієнти селективності компонентів сплаву	
			Be <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Z <sub>Be</sub>	Z <sub>Cu</sub>
1	0,5 М FeCl <sub>3</sub>	1,61	0,0964	5,04	0,95	1,1
2	1,0 М FeCl <sub>3</sub>	2,99	0,0915	5,57	0,8	1,24
3	0,5М FeCl <sub>3</sub> + 0,5М Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	2,2	0,0628	3,86	0,81	1,25
4	0,5М FeCl <sub>3</sub> + 0,5М Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> + 0,25М H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,3	0,0459	2,27	1,0	1,0
5	0,5М FeCl <sub>3</sub> + 0,5М Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> + 0,5М HCl	2,4	0,0625	3,45	0,9	1,1

Однак дані результати стосуються швидкості травлення латуні тільки в початковий момент часу. По мірі розчинення компонентів сплаву БрБ2 змінюється склад травильного розчину і, відповідно, швидкість розчинення компонентів сплаву. У зв'язку з цим дуже важливою є перевірка стабільності процесу травлення берилієвої бронзи в часі. Для цього були зняті  $v - \tau$ – криві зміни швидкості розчинення сплаву БрБ2, представлені на рис. 1:



**Рис. 1.** Зміна швидкості травлення сплаву БрБ2 в часі.

У розчинах складу моль / л:

1–0,5М FeCl<sub>3</sub>; 2–1,0М FeCl<sub>3</sub>; 3–0,5М FeCl<sub>3</sub> + 0,5М Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> + 0,5М HCl; 4–0,5М FeCl<sub>3</sub> + 0,5М Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> + 0,25М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 5–0,5М FeCl<sub>3</sub> + 0,5М Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>

Вид кривих  $v$ - $\tau$  (рис. 1) подібний до кривих при травленні чистої міді та мідних сплавів[16]. Ми розглядали нахил прямолінійної ділянки кривої  $v$ - $\tau$  в середині циклу травлення. Для травильних розчинів, що мають східчастий вид залежності  $v$ - $\tau$  виділення однієї прямолінійної ділянки неможливо. Це не означає, що чим менше швидкість травлення, тим процес більш тривалий і навпаки.

В деяких розчинах відбувається різке припинення травлення з випадінням осаду малорозчинної сполуки, при цьому нахил кривої  $v$ - $\tau$  малий. Дуже важливо підібрати такий склад розчинів для травлення, щоб швидкість розчинення сплаву протягом початкового періоду підвищувалася або зменшувалася не різко, а в середині циклу травлення була б стабільна на проміжному рівні – криві 1, 3 і 4 рис. 1. Згідно з експериментальними даними рис. 1 були обчислені показники травлення, а саме максимальна, мінімальна і середня в часі швидкість травлення сплаву, різниці між значеннями швидкості травлення берилієвої бронзи за цикл травлення, які і наведені в таблиці 2.

Кількісні характеристики травлення для складів розчинів, рекомендованих як високошвидкісні (криві 3 і 4, рис. 1), одночасно відрізняються найбільш високими значеннями різниці швидкостей травлення бронзи БрБ2 ( $v_{max} - v_{min}$ ), ( $v_{max} - v_{med}$ ) і ( $v_{med} - v_{min}$ ) (склади розчинів 3 і 4 відповідно в таблиці 2). Саме дані показники, а не первісне значення швидкості травлення, оптимально характеризують здатність розчину до тривалого високошвидкісного травлення сплаву.

**Таблиця 2.** Кількісні характеристики травлення сплаву БрБ2

№ п\п	Склад розчину, моль/л	*Швидкість травлення сплаву БрБ2, кг/м <sup>2</sup> ·с			Різниця між значеннями швидкості травлення сплаву БрБ2		
		$v_{max}$	$v_{min}$	$v_{med}$	$v_{max} - v_{min}$	$v_{max} - v_{med}$	$v_{med} - v_{min}$
1	0,5М FeCl <sub>3</sub>	1,61	0,39	1	1,22	0,61	0,61
2	0,5М FeCl <sub>3</sub> + 0,5М Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2,0	0,7	1,35	1,3	0,65	0,65
3	0,5М FeCl <sub>3</sub> + 0,5М Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> + 0,25М H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,2	0,77	1,5	1,43	0,7	0,73
4	0,5М FeCl <sub>3</sub> + 0,5М Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> + 0,5М HCl	2,5	0,8	1,65	1,7	0,85	0,85
5	1,0М FeCl <sub>3</sub>	2,7	0,3	1,5	2,4	1,2	1,2

\* $v_{max}$  – максимальне значення швидкості травлення сплаву БрБ2 за цикл травлення;  $v_{min}$  – мінімальне значення швидкості травлення сплаву БрБ2 за цикл травлення;  $v_{med}$  – середнє значення швидкості травлення сплаву БрБ2 за цикл травлення.

Висока швидкість травлення в розчині 1,0М FeCl<sub>3</sub> (крива 2, рис.1) в порівнянні іншими обумовлена, перш за все, найбільшою концентрацією іона - окислювача Fe<sup>3+</sup>.

Швидкість розчинення сплаву зростає як в залежності від концентрації іона Fe<sup>3+</sup>, так і від сумарної концентрації іонів хлору і рН розчину, що забезпечують добавки до розчину 0,5М FeCl<sub>3</sub> у вигляді Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> та кислот HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Саме цим можна обґрунтувати високошвидкісне травлення сплаву БрБ2 в розчині 0,5М FeCl<sub>3</sub> + 0,5М Fe (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> + 0,5М HCl. Крім того, зростання швидкості розчинення берилієвої бронзи можна пояснити утворенням в розчині комплексів заліза (III), що активують розчинення мідної складової сплаву, в той час як зниження рН розчину забезпечує розчинення берилієвої компоненти сплаву БрБ2.



### *Дослідження рівномірності розчинення берилієвої бронзи*

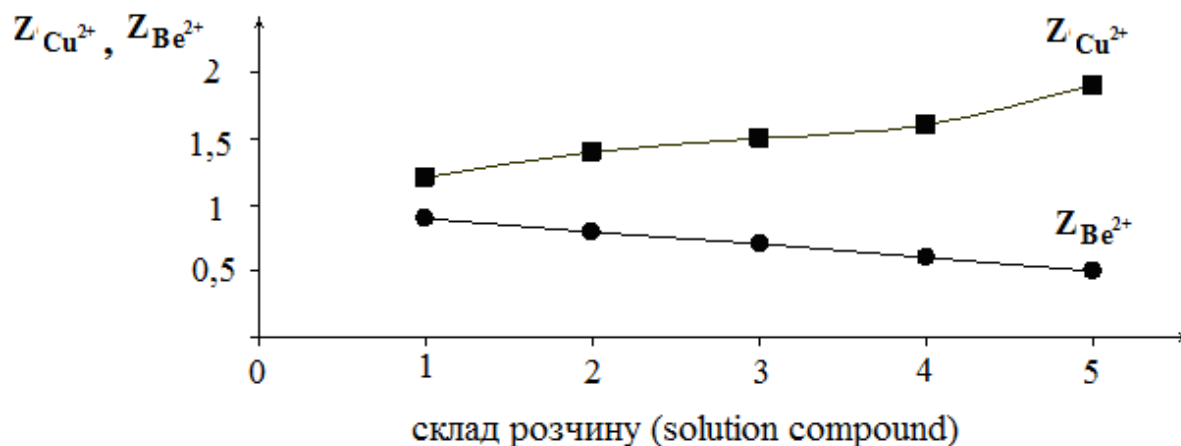
Розчинення берилієвої бронзи проводили в одному і тому ж об'ємі розчину до появи завислої твердої фази. Концентрації метало-іонів в відпрацьованих розчинах, визначені атомно-абсорбційним методом, представлені в таблиці 3. Удосконалити технологічний процес травлення можна за рахунок збільшення його тривалості без скидання відпрацьованих розчинів в промисловий стік. У цьому випадку використовують розчини, що мають найбільш високу ємність по компонентам сплаву – це розчини складу 3 (22,1 г/л) і складу 4 (22,2г/л) таблиці 3. Сумарна концентрація іонів міді і берилію в даний момент часу відповідає «ємності» розчину по компонентам сплаву БрБ2, які розчиняються.

**Таблиця 3.** Результати атомно - абсорбційного аналізу виснажених травильних розчинів (час травлення сплаву БрБ2 200 хв.; 25°C)

№ п/п	Склад розчину, моль/л	Тривалість циклу травлення до початку випадіння осаду, хв	Концентрації іонів, г/л		Сумарна концентрація іонів міді і берилію, г / л
			Be <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	
1	0,5M FeCl <sub>3</sub>	160	0,175	10,27	10,45
2	0,5M FeCl <sub>3</sub> + 0,5M Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	180	0,291	19,98	20,27
3	0,5M FeCl <sub>3</sub> + 0,5M Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> + 0,25M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	160	0,304	21,78	22,1
4	0,5M FeCl <sub>3</sub> + 0,5M Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> + 0,5M HCl	180	0,281	21,93	22,2
5	1,0M FeCl <sub>3</sub>	160	0,222	20,8	21,0

Дуже важливо для оптимізації технологічного процесу травлення, щоб склад травильного розчину забезпечував рівномірність розчинення компонентів берилієвої бронзи. Кількісними показниками, за допомогою яких можна судити

про рівномірність або вибіркковість розчинення сплавів, є коефіцієнти селективності розчинення компонентів сплаву  $Z$ . Коефіцієнти  $Z_{\text{Be}}$  і  $Z_{\text{Cu}}$  для берилієвої бронзи були розраховані на підставі результатів атомно-абсорбційного аналізу розчинів за концентраціями іонів міді і берилію, які перейшли в розчин, і за даними про точний склад сплаву БрБ2 (рис. 2):



**Рис. 2.** Коефіцієнти селективності розчинення компонентів сплаву БрБ2 після 200 хв травлення в розчинах різного складу: 1 – 0,5М FeCl<sub>3</sub>; 2 – 0,5М FeCl<sub>3</sub> + 0,5М Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>; 3 – 0,5М FeCl<sub>3</sub> + 0,5М Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> + 0,25М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 4 – 0,5М FeCl<sub>3</sub> + 0,5М Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> + 0,5М HCl; 5 – 1,0М FeCl<sub>3</sub>

Як видно з рис.2, коефіцієнти селективності після 200 хв. травлення найбільш близькі в розчині – 0,5М FeCl<sub>3</sub>, тобто саме цей склад травильного розчину забезпечує рівномірне травлення по обом компонентам сплаву БрБ2. Починаючи з розчину складу 2 і далі 3, 4, 5 (рис.2) можна говорити про збільшення вибіркового розчинення мідної компоненти сплаву як при травленні 20 хв. часу, так і при 200 хв. Це можна пояснити східчастою іонізацією мідної складової сплаву БрБ2, тобто спочатку до Cu(I), потім по другій сходинці відбувається окислення сполук Cu(I) розчиненим киснем [17]. Щодо іонів берилію, то вони з іонами хлору утворюють малостійкі комплекси. Більш того, якщо порівняти коефіцієнти селективності розчинення компонентів сплаву після 20 хв травлення (див. табл.1) і після тривалого травлення (200 хв), то з

усіх досліджуваних розчинів саме склад розчину 0,5М FeCl<sub>3</sub> забезпечує рівномірне травлення по обом компонентам сплаву і в початковий момент і після тривалого травлення (розчин 1 рис 2). Селективність розчинення міді більш виражена в розчинах складу 3,4, 5 для яких значення рН нижче. Однією з причин цього може бути підвищення стійкості мідно-хлоридних комплексів [18].

### ***Дослідження природи малорозчинних сполук, що утворюються при виснаженні травильних розчинів***

При повному виснаженні травильних розчинів в них утворюються малорозчинні сполуки. Мінералогічний склад цих сполук було визначено рентгенофазовим аналізом (табл.4).

Як видно з табл. 4 в кожному зразку присутня фаза FeOOH і фаза CuCl<sub>2</sub> (H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> в найбільшій кількості. Причому осад отриманий з розчину складу 0,5М FeCl<sub>3</sub> + 0,5М Fe (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> + 0,5М HCl більш збагачений CuCl<sub>2</sub> (H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> (42,7%) в порівнянні з осадом з розчину складу 0,5М FeCl<sub>3</sub>, в якому вміст CuCl<sub>2</sub> (H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> становить 21,4%. Це доводить, що найбільшою ємністю по мідній компоненті сплаву БрБ2 має саме розчин складу 0,5М FeCl<sub>3</sub> + 0,5М Fe (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> + 0,5М HCl, що узгоджується і з результатами атомно-абсорбційного аналізу (см.табл. 3).

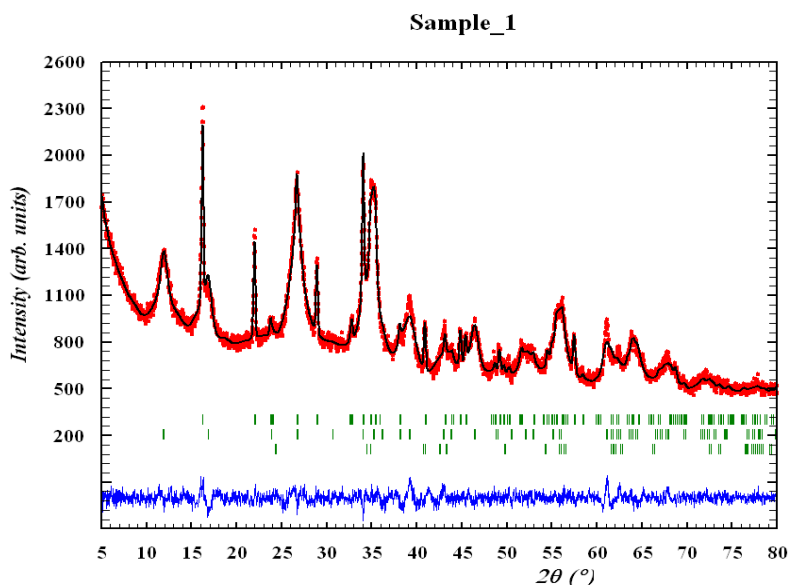
Як видно на рентгендифракційних спектрах (рис. 3) малорозчинних сполук, що отриманні з розчину складу 1 (табл № 4) спостерігаються вузькі та високі дифракційні піки з чого зрозуміло, що і фаза FeOOH і фаза CuCl<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> є добре окристалізованими сполуками та відрізняються розмірами кристалітів.

Берилій не входить до складу сполук осаду і залишається в рідкій фазі у вигляді комплексів (див. табл.4). Раніше нами було доведено, що кислотність середовища сприяє утворенню комплексних частинок берилію, а саме не тільки хлоридних комплексів BeCl<sup>+</sup> та BeCl<sub>2</sub>, а навіть – Be(OH)<sub>2</sub> і BeOH<sub>2</sub><sup>+</sup>. [18]. Як видно з результатів рентгенофазового аналізу отриманих малорозчинних сполук в досліджуваних відпрацьованих травильних розчинах не ідентифіковано сполуки одновалентної міді. Відсутність в осаді сполук Cu (I) доводить перебіг двохстадійного окислення міді і накопичення іонів Cu<sup>2+</sup> в

розчині. Це відмінна риса розчинів на основі  $\text{FeCl}_3$ . У хлоридвмістних розчинах, які не містять сильного окислювача, мідь накопичується у вигляді хлоридних комплексів  $\text{Cu(I)}$ , які досить швидко розпадаються з утворенням осаду з малорозчинних сполук. Таким чином, доцільність використання багатокомпонентних травильних розчинів, крім рівномірності травлення сплаву, підтверджується їх більшою ємністю по іонам компонентів сплаву.

**Таблиця 4.** Фазовий склад і характеристики фаз в зразках

№ з/п	Склад травильного розчину	Фаза	Мас. %	Параметри ґраток (Å, °)	Ср. розмір кристалітів, (нм)
1	0,5M $\text{FeCl}_3$	$\text{CuCl}_2(\text{H}_2\text{O})_2$ _Eriochoalcite_Pmna	21.4(3)	a=8.0815(4); b=3.74118(3) c=7.4060(4)	51
		FeOOH-beta_Akaganeite_I4/m	77.8(3)	a=10.5448(3) c=3.03452 (5)	9
		$\text{Fe}_2\text{O}_3$ _Hematite_R-3c	0.89(11)	a=5.2106 c=12.5469	75
2	0,5M $\text{FeCl}_3$ + 0,5M $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$	$\text{CuCl}_2(\text{H}_2\text{O})_2$ _Eriochoalcite_Pmna	16.2(2)	a=8.0692(5) b=3.7333(4) c=7.3974(6)	54
		FeOOH-beta_Akaganeite_I4/m	34.2(5)	a=10.5612(5) c=3.0274(3)	17
		$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ _Hydromolysite_C2/m	47.3(9)	a=12.212(2) b=6.756(3) c=6.254(6) c=105.32(3)	9
		$\text{Cu}(\text{OH})_2$ _Spertiniite_Cmc2 <sub>1</sub>	2.4(2)	a=2.9918(18) b=10.716(8) c=5.204(2)	23
3	0,5M $\text{FeCl}_3$ + 0,5M $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$ + 0,5M HCl	$\text{CuCl}_2(\text{H}_2\text{O})_2$ _Eriochoalcite_Pmna	42.7(5)	a=8.08487(17) b=3.7434(2) c=7.41062(18)	126
		FeOOH-beta_Akaganeite_I4/m	57.3(8)	a=10.5755(16) c=3.0349(7)	5
4	1,0M $\text{FeCl}_3$	$\text{CuCl}_2(\text{H}_2\text{O})_2$ _Eriochoalcite_Pmna	19.6(4)	a=8.0763(4) b=3.7312(4) c=7.4024(4)	31
		FeOOH-beta_Akaganeite_I4/m	80.4(7)	a=10.5447(14) c=3.0337(6)	5



**Рис.3.** Рентгендифракційний спектр малорозчинних сполук, які отримані з розчину 0,5М FeCl<sub>3</sub>: а – реальний спектр, б – штрих-діаграма, в – модельний розподіл ліній спектру

### Висновки

- Досліджено процес хімічного розчинення берилієвої бронзи в розчинах різних електролітів та стабільність його в часі;
- Вивчено селективність розчинення компонентів сплаву БрБ2 при довготривалому травленні та визначено, що склад розчину 0,5М FeCl<sub>3</sub> забезпечує рівномірне травлення по обом компонентам сплаву БрБ2;
- Встановлена хімічна природа малорозчинних сполук, які утворюються при виснаженні травильних розчинів. Відсутність сполук одновалентної міді доводить перебіг двохстадійного окислення міді і накопичення іонів Cu<sup>2+</sup> в розчині.
- Запропоновані склади розчинів електролітів, які забезпечують високошвидкісне, довготривале хімічне травлення, з високою ємністю по компонентам сплаву БрБ2: 0,5М FeCl<sub>3</sub> + 0,5М Fe (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> + 0,5М HCl та 0,5М FeCl<sub>3</sub> + 0,5М Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> + 0,25М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

### Література

- [1] Черкасов С. Печатный монтаж / С. Черкасов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес – 2005. – № 6. – С. 67-69.

- [2] Шмаков М. Школа производства ГПИС. Фотолитография. Третий этап – передача рисунка на материал интегральной микросхемы / М Шмаков, В. Паршин // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 5. – С. 72-77.
- [3] Тебякин А., Фоканов А., Подуражная В. Многофункциональные медные сплавы / Труды ВИАМ. – 2016 - № 12(48) - С. 37-44.
- [4] Качагин А., Н. Кривохижина Н., Савицкий А., Короткова Н. Создание комплекса изготовления пружинных деталей / Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. - 2008 - № 5 - С. 41-46.
- [5] Медведев А. Материалы для гибких печатных плат / Технологии в электронной промышленности. – 2011 – № 3– С.12-19.
- [6] Walker P., Tarn W. H. Handbook of metal etchants. – Boston London NewYork Washington CRC Press LLC Boca Raton, D.C., 1991 – 1415 p.
- [7] Altenberger I., Kuhn H. A. and Müller H. R. Material properties of high-strength beryllium-free copper alloys / Int. J. Materials and Product Technology. – 2015– Vol. 50, No. 2, – P.124-145.
- [8] Corrosion behavior of different brass alloys for drinking water distribution systems J. Choucri, F. Zanotto, V. Grassi, A. Baibo, M. Touhami, I. Mansouri, C. Monticelli // Metals. - 2019 - № 9(649) - P. 1-19.
- [9] Козадеров О. А. Гетерогенное фазообразование и развитие поверхности при селективном растворении сплавов / Конденсированные среды и межфазные границы. – 2016 –Том 18, № 4, С. 444—459.
- [10] Erlebacher J. Dealloying of Binary Alloys Evolution of Nanoporosity. – New-York (USA) In book: Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology., CRC Press, SSSR, 1979 – vol. 15, pp. 62—131. 2004 – , pp. 893—902.
- [11] Медведев А. Конструкции и принципы изготовления печатных плат / Технологии в электронной промышленности. – 2011–№ 4– С. 12-18.
- [12] Смертина Т. Подготовка поверхности меди. Механическая или химическая? / Технологии в электронной промышленности. 2011 – № 3 – с. 12-19.
- [13] Смертина Т. Высокоточное травление. От теории к практике / Технологии в электронной промышленности. 2008 – № 3 – с. 12-19.
- [14] Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір 48174 Україна. Визначення твердості матеріалів втискуванням сферичного індентора / Мощенок В.І. – авторські права належать Мощенок В.І., ХНАДУ, дата реєстрації 04.03.2013.
- [15] Rodriguez-Carvajal J., Roisnel T. FullProf. 98 and WinPLOTR: New Windows 95/NT Applications for Diffraction. Commission for Powder Diffraction, International Union of Crystallography, Newsletter No.20 (May-August) Summer 1998.
- [16] Изучение процесса травления  $\alpha$  – латуни в концентрированных хлоридных рас творах. Л. М. Егорова, Э. Б. Хоботова, В. И. Ларин, О. И. Юрченко, М. А. Добриян, Н. П. Титова // Вопр. химии и хим. технологии. – 2009. – № 6. – С.155–159.
- [17] Хоботова Э.Б., Ларин В.И. Электрохимическое поведение меди в растворах хлорида меди (II) / Укр. хим. журн. – 1996. – Т. 62, № 10. – С. 107-112.
- [18] Ларин В.И, Егорова Л. Химическая ионизация сплава бериллиевой бронзы в хлоридных растворах/ Укр. хим. журнал. – 2018. – Т. 84, №3. – С. 20-27.