

Химическое травление сплава БрБ2 в растворах электролитов

Л. М. Егорова^{a*}, В. И. Ларин^{b**}, В. В. Даценко^a

^aХарьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
г. Харьков, 61002, Украина

^bНИИ химии при Харьковском национальном университете им. В. Н. Каразина,
г. Харьков, 61022, Украина

*e-mail: lilyaegorova@ukr.net

**e-mail: vasili.i.Larin@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 21.06.2021

После доработки 01.09.2021

Принята к публикации 03.09.2021

Исследован процесс химического травления сплава БрБ2 в растворах различного состава. Определена скорость растворения бериллиевой бронзы в исследуемых растворах и изучено ее изменение во времени. Установлена селективность растворения компонентов бериллиевой бронзы БрБ2 при длительном травлении в растворах разных электролитов. Показана возможность достижения равномерного растворения сплава БрБ2 за счет варьирования состава травильного раствора. Определены концентрации металлоионов в отработанных растворах и вычислена емкость травильных растворов. Установлены составы растворов с высокой емкостью по обоим компонентам сплава при длительном травлении. Предложены оптимальные составы травильных растворов, обеспечивающие качественное травление бериллиевой бронзы по нескольким критериям – высокая скорость процесса, равномерное растворение компонентов сплава, высокая емкость по обоим компонентам бериллиевой бронзы. Изучена морфология поверхности электрода из БрБ2 после травления в растворах, обеспечивающих равномерное растворение и по медной, и по бериллиевой компоненте. Показано отсутствие пассивации поверхности после химического травления в этих растворах. Установлена химическая природа соединений, образующихся в виде мелких включений на протравленной поверхности электрода. Результаты имеют большое значение при практическом использовании, поскольку позволяют выбрать состав травильного раствора, что в свою очередь помогает оптимизировать технологический процесс травления.

Ключевые слова: бериллиевая бронза, травление, раствор, селективность растворения, морфология поверхности сплава

УДК 621.794.42:546.56

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.1.22>

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых видов металлических материалов, обладающих повышенными механическими, эксплуатационными свойствами, непременно должно сопровождаться оценкой их коррозионной стойкости, так как разрушение металла под действием среды может свести на нет все положительные свойства материала. В связи с этим повышается спрос на медно-бериллиевые сплавы, которые используют при изготовлении мобильных телефонов, планшетов, ноутбуков и других современных мобильных устройств, содержащих в себе ответственные детали, изготовленные из бериллиевой бронзы. Наиболее часто применяют высоколегированные бериллиевые бронзы с содержанием бериллия ~ 2%, такие как сплав марки БрБ2, или, по зарубежной спецификации, 25 (C17200) [1]. Очень важно соблюдать в этих технологиях минимальное повреждение поверхностного слоя бериллиевой бронзы, поэтому для подготовки выбирают химический процесс травления [2–4].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Анализ литературных данных показал, что результаты изучения химического и анодного растворения бериллиевой бронзы в концентрированных водных средах практически отсутствуют.

При изготовлении печатных плат применяют технологическую операцию химического травления (химического растворения) меди и медных сплавов, в том числе и бериллиевых бронз [5]. При травлении медных сплавов показателями качества являются: проведение процесса с высокой скоростью, равномерностью травления во времени, равномерностью по растворению компонентов сплава, большой емкостью раствора по металлоионам – компонентам сплава. Кроме того, рассматривая процесс травления с химической точки зрения, важно учитывать зависимость фактора подтравливания от состава травильного раствора. Именно поэтому основной экспериментально-

исследовательской задачей стала разработка химических составов травильных растворов, сочетающих в себе высокие показатели травления и обеспечивающих создание равномерного микрорельефа с развитой площадью поверхности [6–8]. В связи с этим необходимо подбирать состав травильного раствора, который и обеспечивает скорость травления, «емкость» по ионам компонентов растворения металлической фазы, равномерность растворения сплава, срок службы раствора, возможность его регенерации, экономическую целесообразность использования, качественные показатели: отсутствие образования доменов, шламов и подтравливания.

Цель работы – исследование химического растворения сплава БрБ2 в растворах различного состава и оптимизация технологического процесса травления бериллиевой бронзы за счет подбора оптимального состава раствора травления.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Определение скорости химического травления с помощью гравиметрического метода основывалось на использовании вращающегося дискового электрода (ВДЭ), изготовленного из сплава БрБ2 ($S = 6,4 \times 10^{-5} \text{ м}^2$), при $\omega = 74 \text{ об} \cdot \text{с}^{-1}$. Элементный состав сплава БрБ2 определен гравиметрическим методом по ГОСТ 15027.13-77. Массовая доля бериллия в сплаве БрБ2 составляет 1,78%.

Для выяснения состояния материала (сплав БрБ2), а именно закаленный или состаренный, было проведено определение твердости сплава БрБ2 по Бринеллю *НВ* на твердомере УИТ-НВW-1S с помощью программы «Определение твердости материалов вдавливанием сферического индентора». В основе программы, по которой определялась твердость, лежит ДСТУISO 6506-1 [9]. Была определена твердость по Бринеллю *НВ* = 284,3, что соответствует состаренному состоянию бериллиевой бронзы [10].

Это очень важно с точки зрения того, что процесс старения бериллиевой бронзы БрБ2 оказывает существенное влияние на ее физико-механические свойства. Как известно, особенностью бериллиевых бронз является большой диапазон изменения физико-химических свойств при термообработке. В закаленном состоянии эти сплавы обладают высокой ударной вязкостью. После старения вязкость бериллиевой бронзы резко падает, а прочность и твердость возрастают. Именно поэтому свойства, полученные при состаривании очень важны для обеспечения долгосрочной надежности деталей из бериллиевой бронзы [11].

Морфологические особенности протравленной поверхности сплава БрБ2 изучали методом электронно-зондового микроанализа (ЭРМА) на сканирующем микроскопе JSM-6390 LV с системой рентгеновского микроанализа INCA.

Содержание ионов Be^{2+} и Cu^{2+} в отработанных травильных растворах определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии, используя спектрометр атомной абсорбции МРА-915 МД. Результаты, полученные с помощью этого метода, позволяют рассчитать коэффициенты селективности растворения компонентов сплава, которые, в свою очередь, являются основанием для вывода о равномерности или избирательном растворении компонентов медного сплава.

Выбор состава травильных растворов был обусловлен их практическим использованием в процессах травления бериллиевой бронзы. Как известно, ранее для травления бериллиевой бронзы использовали кислый раствор на основе CuCl_2 , основным недостатком которого являются низкая скорость травления и большой боковой подтрав [3]. Кроме того, утилизация такого раствора приводит к необходимости выделения большого количества меди, что затрудняется низким значением ее предельно допустимых концентраций в сточных водах. Следует отметить и высокую себестоимость солей меди. По этим причинам на производстве используют более дешевый травильный раствор, обеспечивающий высокую скорость травления. К таким травильным растворам принадлежит состав на основе FeCl_3 , который и был взят за основной состав для приготовления модельных травильных растворов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью метода вращающегося дискового электрода была измерена скорость химического растворения бериллиевой бронзы БрБ2 в растворах различного состава. Исследования проводили при скорости вращения электрода ($S = 6,4 \times 10^{-5} \text{ м}^2$) из БрБ2 74 об/с, что имитирует гидродинамические условия струйного травления и позволяет снять диффузионные ограничения по отведению продуктов растворения медной компоненты бериллиевой бронзы в объем раствора. Для оценки избирательности процесса химического растворения по компонентам сплава определили содержание ионов Cu^{2+} и Be^{2+} в отработанных травильных растворах с помощью метода атомной абсорбции. Сначала химическое травление бериллиевой бронзы в исследуемых растворах проводили 20 мин (при $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$), на

Таблица 1. Результаты исследования скорости ионизации сплава БрБ2 и селективности растворения компонентов сплава в исследуемых растворах (время травления сплава БрБ2 20 и 200 мин; 25 °С)

Физ.-хим. параметр	Состав раствора									
	0,5M FeCl ₃		0,5M FeCl ₃ + 0,5M Fe(NO ₃) ₃		0,5M FeCl ₃ + 0,5M Fe(NO ₃) ₃ + 0,25M H ₂ SO ₄		0,5M FeCl ₃ + 0,5M Fe(NO ₃) ₃ + 0,5M HCl		1,0M FeCl ₃	
	τ = 20 мин	τ = 200 мин	τ = 20 мин	τ = 200 мин	τ = 20 мин	τ = 200 мин	τ = 20 мин	τ = 200 мин	τ = 20 мин	τ = 200 мин
$V_{med} \times 10^{-3}$, кг/м ² ·с	1,6	1,0	2,2	1,35	2,3	1,5	2,4	1,65	1,5	2,99
Концентрации ионов, г/л Cu ²⁺	5,04	10,27	3,86	19,98	2,27	21,78	3,45	21,93	5,57	20,8
Концентрации ионов, г/л Be ²⁺	0,096	0,175	0,063	0,291	0,046	0,304	0,063	0,281	0,092	0,222
$\frac{V_{med} \times 10^{-3} (\tau = 20 \text{ мин})}{V_{med} \times 10^{-3} (\tau = 200 \text{ мин})}$	1,6		1,6		1,5		1,5		2,0	
$\frac{C_{Cu^{2+}} (\tau = 200 \text{ мин})}{C_{Cu^{2+}} (20 \text{ мин})}$	2,0		5,2		9,6		6,3		3,7	
$\frac{C_{Be^{2+}} (\tau = 200 \text{ мин})}{C_{Be^{2+}} (20 \text{ мин})}$	1,8		4,6		6,6		4,5		2,4	

основании чего и были выбраны составы растворов, обеспечивающих не только высокую скорость травления, а и равномерность растворения бериллиевой бронзы БрБ2 по компонентам сплава. Затем в выбранных растворах провели длительное травление сплава БрБ2 до появления взвешенной фазы и определили содержание ионов Cu²⁺ и Be²⁺ в отработанных травильных растворах (табл. 1).

В ходе процесса травления бериллиевой бронзы БрБ2 состав раствора меняется, в нем накапливаются ионы Cu²⁺ и плотность раствора увеличивается. Как известно, наблюдается зависимость скорости травления сплава БрБ2 от количественного содержания ионов меди в растворе, а именно – при слишком малом и слишком большом содержании ионов меди в растворе происходит резкое изменение скорости травления, что является показателем нестабильности процесса и неприемлемо для эксплуатации. Это приводит к необходимости очень часто корректировать рабочий раствор, что связано с высоким расходом химикатов и необходимостью утилизации больших объемов отработанных травильных растворов.

Для поддержания параметров процесса травления на постоянном уровне необходимо как можно дольше сохранять травящую способность раствора. Именно поэтому одной из наиболее важных характеристик травильных растворов является их емкость. К основным требованиям, которым должны соответствовать травильные растворы, относится высокая емкость по меди (20 г/л и более) [7]. Рабочая емкость травильных растворов соответствует такой концентрации меди в растворе, при которой скорость травления снижается в 1,5–2 раза по сравнению со свежим

раствором. С целью оптимизации состава травильного раствора установлена взаимосвязь между снижением скорости ионизации сплава БрБ2 от накопления ионов Cu²⁺ и Be²⁺ в травильном растворе при травлении 20 и 200 мин.

Как видно из табл. 1, состав 0,5M FeCl₃ + 0,5M Fe(NO₃)₃ + 0,25M H₂SO₄ обеспечивает наименьшее снижение скорости процесса в 1,5 раза при наиболее высоком показателе увеличения концентрации ионов как Cu²⁺, так и ионов Be²⁺ в растворе за цикл травления. Несколько менее накапливаются ионы Cu²⁺ (увеличение в 6,3 раза, табл. 1) и ионы Be²⁺ при таком же снижении скорости в растворе состава 0,5M FeCl₃ + 0,5M Fe(NO₃)₃ + 0,5M HCl.

Так как с изменением состава травильного раствора изменяется и скорость процесса, то очень важна проверка стабильности процесса травления бериллиевой бронзы во времени. Для этого было изучено изменение скорости растворения сплава БрБ2 во времени и представлено на рис. 1.

Вид зависимости скорости растворения БрБ2 в исследуемых растворах (рис. 1) от времени идентичен зависимости v – τ при травлении чистой меди и медных сплавов [12]. Для оптимизации технологического процесса химического травления бериллиевой бронзы необходимо, чтобы состав травильного раствора был таким, который обеспечит высокую скорость растворения сплава вначале и не скачкообразное ее снижение, а стабильную скорость в середине цикла травления. Данным требованиям, как видно из рис. 1, соответствуют растворы состава 1, 3 и 4. А именно: при растворе состава 1 поддерживается стабильная скорость травления в

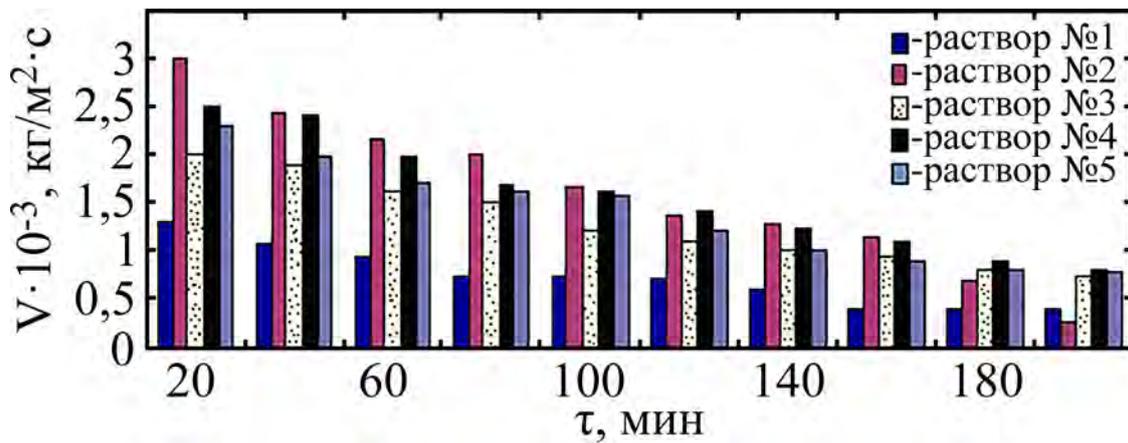


Рис. 1. Диаграмма изменения скорости травления сплава БрБ2 во времени. В растворах состава, моль/л: 1 – 0,5М FeCl₃; 2 – 1,0М FeCl₃; 3 – 0,5М FeCl₃ + 0,5М Fe(NO₃)₂ + 0,5М HCl; 4 – 0,5М FeCl₃ + 0,5М Fe(NO₃)₂ + 0,25М H₂SO₄; 5 – 0,5М FeCl₃ + 0,5М Fe(NO₃)₂.



1, 2 – концентрации ионов Cu²⁺, г/л в растворе после травления 200 и 20 мин соответственно; 3, 4 – концентрации ионов Be²⁺, г/л в растворе после травления 200 и 20 мин соответственно.

Рис. 2. Содержание ионов (в г/л) Cu²⁺ и Be²⁺ после 20 мин травления сплава БрБ2 и после истощения (200 мин) в отработанных травильных растворах состава: 1 – 0,5М FeCl₃, 2 – 0,5М FeCl₃ + 0,5М Fe(NO₃)₂; 3 – 0,5М FeCl₃ + 0,5М Fe(NO₃)₂ + 0,25М H₂SO₄; 4 – 1,0М FeCl₃; 5 – 0,5М FeCl₃ + 0,5М Fe(NO₃)₂ + 0,5М HCl.

интервале 80–140 мин цикла; при растворе 3 – в интервале 100–160 мин; 4-й раствор, при котором с 80 по 160 мин скорость снижается плавно, менее двух предыдущих составов обеспечивает стабильность. Высокая скорость травления в растворе 1,0М FeCl₃ по сравнению с другими обусловлена, прежде всего, наибольшей концентрацией иона-окислителя Fe³⁺, но в этом растворе скорость процесса уменьшается скачкообразно начиная с 40 мин и практически до конца цикла травления.

Растворение бериллиевой бронзы проводили в одном и том же объеме раствора до появления взвешенной твердой фазы. Концентрации metalloионов в отработанных растворах, определенные методом атомно-абсорбционной спектроскопии, представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, накопление ионов Cu²⁺ и Be²⁺ в травильном растворе, а значит и

растворение как медной, так и бериллиевой компоненты сплава (кривые 2, 4, рис. 2) на начальном этапе травления более всего происходит в растворах 0,5М FeCl₃ и 1,0М FeCl₃. При этом состав раствора 1,0М FeCl₃ обеспечивает большее растворение компонентов сплава БрБ2 по сравнению с другими составами травильных растворов, что обусловлено большей концентрацией иона-окислителя Fe³⁺ в растворе. При длительном травлении концентрация Fe³⁺ снижается, что влияет на снижение скорости травления. Ранее в работе [13] нами было обосновано, что можно выделить два фактора, способствующих увеличению скорости растворения сплава БрБ2: увеличение концентрации лигандов (Cl⁻) для образования комплексов ионов меди и увеличения концентрации ионов-окислителей (Fe³⁺). Для растворения второго компонента сплава – Be очень важным фактором

Таблица 2. Максимальная суммарная концентрация ионов меди и бериллия за цикл травления (200 мин при 25 °С)

№ п/п	Состав раствора, моль/л	Суммарная концентрация ионов меди и бериллия, г/л
1	0,5M FeCl ₃	10,45
2	0,5M FeCl ₃ + 0,5M Fe(NO ₃) ₂	20,27
3	0,5M FeCl ₃ + 0,5M Fe(NO ₃) ₂ + 0,25M H ₂ SO ₄	22,1
4	0,5M FeCl ₃ + 0,5M Fe(NO ₃) ₂ + 0,5M HCl	22,2
5	1,0M FeCl ₃	21

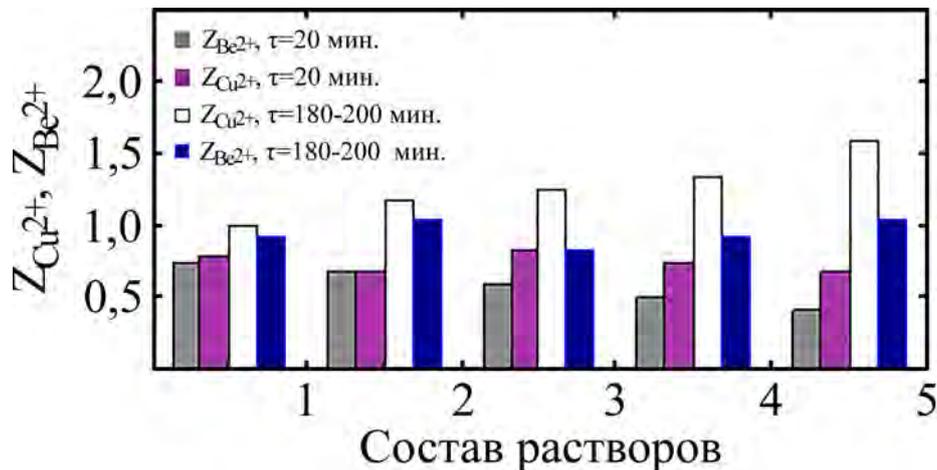
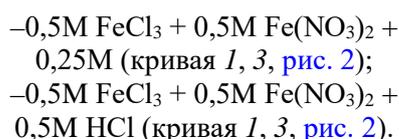


Рис. 3. Коэффициенты селективности растворения компонентов сплава БрБ2 после 20 и 200 мин травления в растворах различного состава: 1 – 0,5M FeCl₃; 2 – 0,5M FeCl₃ + 0,5M Fe(NO₃)₂; 3 – 0,5M FeCl₃ + 0,5M Fe(NO₃)₂ + 0,25M H₂SO₄; 4 – 0,5M FeCl₃ + 0,5M Fe(NO₃)₂ + 0,5M HCl; 5 – 1,0M FeCl₃.

является снижение кислотности среды. Итак, достичь повышения скорости растворения сплава БрБ2 можно не только увеличением концентрации иона-окислителя Fe³⁺, но и увеличением суммарной концентрации ионов хлора и снижением pH раствора. Именно эти условия обеспечивают добавки к раствору 0,5M FeCl₃ в виде Fe(NO₃)₂ и растворов кислот HCl, H₂SO₄.

Рост скорости растворения бериллиевой бронзы с введением добавок к основному составу 0,5M FeCl₃ можно объяснить образованием в растворе аквахлоридных комплексов железа (III) [13], активирующих растворение медной составляющей сплава, в то время как снижение pH раствора обеспечивает растворение бериллиевой компоненты сплава БрБ2. В связи с этим наблюдается максимальное накопление металлоионов компонентов сплава БрБ2 в растворах состава:



Усовершенствовать технологический процесс травления можно за счет увеличения его длительности без сброса отработанных растворов в промышленный сток. В этом случае используют растворы, имеющие наиболее высокую емкость по растворяемым компонентам

сплава: раствор состава 4 (22,2 г/л); состава 3 (21,2 г/л) в табл. 2. Суммарная концентрация ионов меди и бериллия в данный момент времени соответствовала «емкости» раствора по растворяемым компонентам (табл. 2).

На основании вышеприведенных результатов можно сделать вывод, что растворы состава 3 и 4 (табл. 2) обеспечивают не только стабильную скорость процесса химического растворения бериллиевой бронзы БрБ2 при длительном травлении, но и высокую емкость по растворяемым компонентам сплава.

Для оценки равномерности процесса химического растворения бериллиевой бронзы изучена селективность растворения сплава БрБ2 в исследуемых растворах электролитов после 20 мин травления и после длительного травления 200 мин. Количественным показателем, с помощью которого можно судить о равномерности или избирательности растворения сплавов, является коэффициент селективности растворения Z . Коэффициенты Z_{Be} и Z_{Cu} для бериллиевой бронзы были рассчитаны на основании результатов атомно-абсорбционного анализа растворов по концентрациям ионов меди и бериллия, перешедшим в раствор, и по данным о точном составе сплава БрБ2, что представлены на рис. 3.

Например, коэффициент селективности Z_{Be} рассчитывали по формуле:

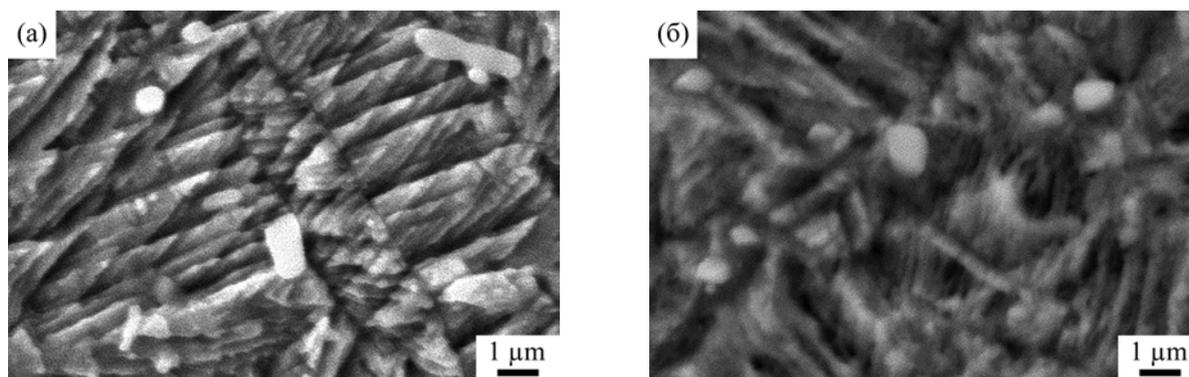


Рис. 4. Микрофотографии поверхности бронзы БрБ2 после травления (при $\omega = 74 \text{ об} \cdot \text{с}^{-1}$) в растворах состава: (а) – 0,5М FeCl₃ + 0,5М Fe(NO₃)₃ + 0,25М H₂SO₄; (б) – 0,5М FeCl₃ + 0,5М Fe(NO₃)₃ + 0,5М HCl.

Таблица 3. Результаты электронно-зондового микроанализа после сканирования поверхности электрода из сплава БрБ2

Состав раствора: 0,5М FeCl ₃ + 0,5М Fe(NO ₃) ₂ + 0,25М H ₂ SO ₄					
Поверхность электрода			«Белое зерно» на поверхности электрода		
Элемент	Весовой %	Атомный %	Элемент	Весовой %	Атомный %
O	3,57	11,17	C	14,79	39,19
Al	0,08	0,16	O	5,48	10,91
Si	0,04	0,06	Al	0,09	0,11
S	0,07	0,10	Si	0,12	0,13
Cl	20,23	28,56	S	0,22	0,21
Fe	0,07	0,06	Cl	12,89	11,57
Ni	0,67	0,55	Fe	0,37	0,21
Cu	75,3	59,33	Ni	10,33	5,60
			Cu	51,86	25,98
			Ne	3,86	6,08
Состав раствора: 0,5М FeCl ₃ + 0,5М Fe(NO ₃) ₂ + 0,5М HCl					
Поверхность электрода			«Белое зерно» на поверхности электрода		
Элемент	Весовой %	Атомный %	Элемент	Весовой %	Атомный %
O	3,15	9,75	C	18,70	46,49
Al	0,05	0,09	O	5,99	11,17
Si	0,11	0,20	Al	0,02	0,03
S	0,20	0,31	Si	0,04	0,095
Cl	23,47	32,75	S	2,38	2,22
Ni	0,64	0,54	Cl	14,96	12,59
Cu	72,38	56,36	Fe	0,18	0,10
			Ni	6,13	3,12
			Cu	51,59	24,24

$$Z_{\text{Be}} = \frac{(\text{Be} / \text{Cu})_{\text{раствор}}}{(\text{Be} / \text{Cu})_{\text{сплав}}},$$

где $(\text{Be}/\text{Cu})_{\text{раствор}}$ – отношение концентраций в растворе, которые определены методом атомно-абсорбционной спектроскопии; $(\text{Be}/\text{Cu})_{\text{сплав}}$ – отношение компонентов в сплаве.

Если сравнить коэффициенты селективности растворения компонентов сплава после 20 мин травления и после длительного травления (200 мин), то из всех исследуемых растворов состав раствора 0,5М FeCl₃ обеспечивает равномерное травление по обоим компонентам сплава и в первоначальный момент, и после длительного травления (раствор 1, рис. 3).

Селективность растворения медной компоненты сплава более выражена в растворах состава 3, 4, 5, для которых значение pH ниже. На основании вышеприведенного показано, что состав травильного раствора 0,5М FeCl₃ обеспечивает равномерное травление и с достаточно высокой скоростью.

Для выяснения отсутствия пассивации поверхности электрода после травления в растворах, состав которых обеспечивает высокие скорость травления и емкость, методом электронно-зондового анализа была исследована поверхность электродов из сплава БрБ2 после травления 20 мин при 25 °С. Чтобы провести сканирование поверхности, от электродов были

отрезаны диски рабочих поверхностей диаметром 9 мм и высотой 4,5 мм.

Как видно из фотографий (рис. 4), на поверхности всех электродов из БрБ2 после травления заметны белые мелкие кристаллы:

На участки поверхности электрода с «белыми зернами» был сфокусирован электронный пучок, что позволило подтвердить предположение о солевой и оксидной природе этих кристаллов (табл. 3).

Атомный и весовой проценты О и Сl достаточно высокие, причем как на всей протравленной поверхности электрода, так и на поверхности «белых зерен» локально, то есть это оксиды и хлориды.

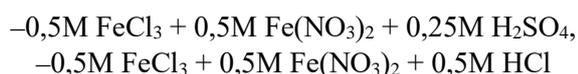
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследован процесс химического растворения бериллиевой бронзы в растворах различных электролитов и изучена стабильность его во времени. Предложены составы растворов высокоскоростного травления сплава БрБ2 при длительном процессе:



2. Изучена селективность растворения компонентов сплава БрБ2 при длительном травлении и определено, что состав раствора 0,5M FeCl₃ обеспечивает высокоскоростное и равномерное травление по обоим компонентам сплава БрБ2.

3. Определено, что растворы состава



обеспечивают не только стабильную скорость процесса химического растворения бериллиевой бронзы БрБ2 при длительном травлении, но и высокую емкость по растворяемым компонентам сплава.

4. Изучена морфология поверхности электрода с БрБ2 после травления в растворах, состав которых демонстрирует наибольшие показатели скорости и близкие к 1 значения коэффициентов селективности растворения компонентов сплава, то есть обеспечивающие равномерное растворение и по медной, и по бериллиевой составляющей. Показано отсутствие пассивации поверхности после химического травления в этих растворах. Установлена химическая природа соединений, образующихся в виде мелких включений на протравленной поверхности электрода.

5. Оптимизирован технологический процесс химического травления бериллиевой бронзы

БрБ2 в растворах разных электролитов, предложены составы травильных растворов, обеспечивающие высокоскоростное травление, высокоскоростное и равномерное травление, стабильное и высокоемкостное травление сплава БрБ2.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нестер, А.А., *Очистка сточных вод производства печатных плат*, Хмельницкий: Изд-во Хмельницкого нац. ун-та, 2016. 219 с.
2. Тебякин, А., Фоканов, А., Подуражная, В., Многофункциональные медные сплавы. *Труды ВИИМ*, 2016, № 12 (48), с. 37.
3. Качагин, А., Кривохижина, Н., Савицкий, А., Короткова, Н., Создание комплекса изготовления пружинных деталей, *Производство электроники: технологии, оборудование, материалы*, 2008, № 5, с. 41.
4. Медведев, А., *Материалы для гибких печатных плат*, *Технологии в электронной промышленности*, 2011, № 3, с. 12.
5. Altenberger, I., Kuhn, H.A., Müller, H.R., Material properties of high-strength beryllium-free copper alloys, *Int. J. Materials Product Technol.*, 2015, vol. 50, no. 2, p. 124.
6. Медведев, А., Конструкции и принципы изготовления печатных плат, *Технологии в электронной промышленности*, 2011, № 4, с. 26.
7. Смертина, Т., Подготовка поверхности меди. Механическая или химическая? *Технологии в электронной промышленности*, т. 205, № 3, с. 12.
8. Смертина, Т., Высокоточное травление. От теории к практике, *Технологии в электронной промышленности*, 2008, № 3, с. 12.
9. Мощенок, В.І., Визначення твердості матеріалів втискуванням сферичного індентора, Україна. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір 48174, 04.03.2013.
10. Осинцев, О.Е., Федоров, В.Н., *Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки. Справочник*, М.: Машиностроение, 2004. 336 с.
11. *Способы металлографического травления*. Справочное издание. М.: Металлургия, 1988. 400 с.
12. Егорова, Л.М., Хоботова, Э.Б., Ларин, В.И., Юрченко, О.И., Изучение процесса травления α – латуни в концентрированных хлоридных растворах, *Вопросы химии и хим. технологии*, 2009, № 6, с. 155.
13. Ларин, В.И., Егорова, Л., Химическая ионизация сплава бериллиевой бронзы в хлоридных растворах, *Укр. хим. журнал*, 2018, т. 84, № 3, с. 20.

Summary

The process of chemical etching of Cu98Be alloy in solutions of various compositions was investigated. The rate of etching of beryllium bronze in the investigated solutions was determined, and its change in time was studied. The selectivity of dissolution of the components of Cu98Be during prolonged etching in solutions of different electrolytes was established. A possibility of achieving uniform etching of Cu98Be alloy by varying the composition of the etching solution was shown. The concentrations of metal ions in the used etching solutions were determined, and the capacity of those solutions was calculated. The compositions of solutions with a high capacity for both alloy components during prolonged etching was established. The optimal compositions of etching solutions providing high-quality etching of beryl-

lium bronze according to several criteria such as: a high process rate, uniform dissolution of alloy components, high capacity for both alloy components were proposed. The morphology of the Cu98Be electrode surface after etching in solutions, providing uniform dissolution for both alloy components, was studied. The absence of surface passivation after chemical etching in these solutions was shown. The chemical nature of the compounds formed in the form of small inclusions on the etched surface of the electrode was established. The obtained results are of great importance in practical use because they allow selecting the appropriate composition of the etching solution, which, in turn, helps to optimize the technological etching process.

Keywords: beryllium bronze, etching, etching solution, dissolution selectivity, morphology of alloy surface