

С. Т. Ермуханова, А. И. Хацринов, С. В. Водопьянова,
А. З. Сулейманова

МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЛОМА ЛАТУНИ И БРОНЗЫ

Ключевые слова: металлургические шлаки, бронза, латунь, выщелачивание, серная кислота, цинк, медь, электролит, электровосстановление, промывные воды.

Развитие технологий, особенно в сфере электроники, машиностроения и строительства, привело к росту использования цветных, редких и благородных металлов, их сплавов и соединений. Спрос на эти материалы неуклонно растет, стимулируя как добычу руды на новых месторождениях, так и поиск альтернативных источников. Среди них особо выделяется возвратное металлосодержащее сырье – лом, отходы, вторичные ресурсы. В результате многолетней добычи и переработки при производстве черных и цветных металлов образуются горы отходов, часто содержащие множество ценных компонентов. Особый интерес представляют отходы металлического лома латуни и бронзы. Латунь и бронза – это сплавы с высоким содержанием меди, но помимо меди, они содержат значительные количества цинка, а также олова, никеля и другие элементы которые также могут быть извлечены и использованы. При создании способа переработки следует учитывать качественный состав сырья, степени окисления металлов в ломе латуни и бронзы, экологичность и безопасность способа. Изучена и разработана технология получения цинка и меди из отходов латуни и бронзы. В качестве способа выщелачивания использовался сернокислотный, агитационный. По схеме «горячего выщелачивания» латуни, выделяющаяся химическим осаждением металлическая медь состоит из 84 % Cu, 14% Zn, а из бронзы – 81 % Cu, 15% Zn. При выщелачивании бронзы кроме меди и цинка из раствора при его охлаждении осаждается олово с содержанием 70 %. При электровосстановлении растворов осаждается металлическая медь с содержанием основного веществ 99 %. По схеме «холодного» выщелачивания латуни, выделяющаяся химическим осаждением металлическая медь состоит из 58 % Cu, 39% Zn. При электровосстановлении из раствора осаждается медь с содержанием основного веществ 99 %, цинк с содержанием основного веществ 91 %, и частично 6,5 % меди.

S. T. Yermukhanova, A. I. Khaterinov, S. V. Vodopyanova,
A. Z. Sulejmanova

METHODS OF RECYCLING SCRAP METAL BRASS AND BRONZE

Keywords: metallurgical slags, bronze, brass, leaching, sulfuric acid, zinc, copper, electrolyte, electroreduction, washing waters.

The development of technology, especially in the field of electronics, mechanical engineering and construction, has led to an increase in the use of non-ferrous, rare and noble metals, their alloys and compounds. The demand for these materials is steadily growing, stimulating both the extraction of ore from new deposits and the search for alternative sources. Among them, returnable metal-containing raw materials stand out - scrap, waste, secondary resources. As a result of many years of mining and processing, the production of ferrous and non-ferrous metals produces mountains of waste, often containing many valuable components. Of particular interest are scrap scrap brass and bronze. Brass and bronze are alloys with a high copper content, but in addition to copper, they contain significant amounts of zinc, as well as tin, nickel and other elements that can also be extracted and used. When creating a processing method, one should take into account the qualitative composition of raw materials, the degree of oxidation of metals in scrap brass and bronze, environmental friendliness and safety of the method. The technology for producing zinc and copper from brass and bronze waste has been studied and developed. As a leaching method, sulfuric acid, agitation was used. According to the "hot leaching" scheme of brass, metal copper released by chemical precipitation consists of 84% Cu, 14% Zn, and bronze - 81% Cu, 15% Zn. When leaching bronze, in addition to copper and zinc, tin with a content of 70% precipitates from the solution when it is cooled. During electroreduction of solutions, metallic copper is precipitated with a content of the main substances of 99%. According to the "cold" leaching scheme of brass, the metal copper released by chemical precipitation consists of 58% Cu, 39% Zn. During electroreduction, copper is precipitated from the solution with a content of the main substances of 99%, zinc with a content of the main substances of 91%, and partially 6.5% of copper.

Введение

В современном производстве металлов с каждым годом усиливается роль возвратного металлосодержащего сырья [1]. Под термином «возвратное сырье» понимается как вторичное сырье (лом и отходы, которые ранее использовались), так и техногенное сырье (отвалы, шлаки, шламы, хвосты, в основном, горно-металлургического производства), которое может быть использовано повторно. В возвратном металлосодержащем сырье, помимо благородных металлов, также содержатся значительные количества цветных и редких металлов (Ni, Cu, Zn, Co, Sn, W и др.). Идентификация химического состава является основой комплексной

переработки металлосодержащего сырья с целью максимального извлечения всех ценных компонентов [2].

Для производства цветных металлов из вторичного сырья широко применяют электрохимические и гидрометаллургические процессы, обеспечивающие высокую селективность извлечения ценных компонентов и комплексность использования сырья, меньшие удельные капитальные затраты и высокую рентабельность переработки сложного и достаточно бедного лома и отходов [2, 3].

Одним из решений проблемы переработки и селективного разделения многокомпонентных сплавов может стать электрохимический способ,

являющийся наиболее популярным за рубежом. Метод позволяет эффективно разделять их по соответствующим продуктам электролиза, основываясь на различиях в электрохимическом поведении меди и легированных металлов [4, 5].

Особое место в решении проблемы комплексного использования вторичного сырья занимают гидрометаллургические технологии [2, 6]. Они характеризуются более высоким качеством и широкой номенклатурой товарной продукции, значительно меньшим расходом топлива и электроэнергии, высокой степенью улавливания отходящих газов и имеют другие преимущества [7].

Промышленные растворители – вода, растворы минеральных кислот, щелочей и солей [8, 9]. В промышленных условиях в качестве растворителей используются кислоты (H_2SO_4 , HCl , HNO_3) и растворы аммиака [8].

В настоящее время в производство вовлекаются запасы минерального сырья, металлические отходы, сложные и маломощные руды, а также продукты их переработки – шлаки, кеки, пыли, возгоны [10].

Интерес к переработке латунного и бронзового лома определяется высоким содержанием в них меди, п, помимо целевого компонента, он также содержит значительное количество цинка. При создании методов переработки следует необходимо учитывать качественный состав сырья, степень окисления металлов в отходах и экологичность безопасного способа [11].

Бронза и латунь – сплавы на основе меди. Кроме того, отдельные марки таких сплавов очень похожи по своему цвету, но при этом их характеристики могут иметь существенные отличия. Основным легирующим элементом в бронзе является олово, в то время как в латуни – цинк. В то же время в основе обоих сплавов лежит один и тот же металл – медь. Бронза, как и латунь, основана на таких металлах, как медь, но подразделяется на совершенно разные категории. Таким образом, бронза может быть оловянной или не содержащая олова, в то время как латунь может быть двухкомпонентной или многокомпонентной [12].

Целью настоящей работы являлась разработка способов получения соединений меди и цинка из отработанных латунных и бронзовых металлургических шлаков.

Экспериментальная часть

Для поиска способов получения соединений меди и цинка из отработанных латунных и бронзовых металлургических шлаков использовали шлам, представленный ООО «МЕДИАН».

Для определения состава шлаков использовались методы: оптической эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, инфракрасной спектроскопии, рентгенофазового анализа.

Для определения химического состава исходные пробы истирались. В итоге полученные образцы были разделены на две части: истертые (1231а, 1232а) и неистертые (металлофаза) (1231б, 1232б).

В результате определены компоненты в шлаках: **бронза** (1231 объедин. проба), %масс.: TiO_2 - 0,07,

MnO - 0,46, Na_2O - 0,53, K_2O - 0,14, SiO_2 - 2,66, MgO - 0,93, CaO - 4,40, Fe_2O_3 - 1,94, Al_2O_3 - 2,82, P_2O_5 - <0,1, Zn - 28,49, Ni - 0,38, Cu - 55,69, Cr - 0,087, V - 0,006; **латунь** (1232 объедин. проба), %масс.: TiO_2 - 0,03, MnO - 0,25, Na_2O - 0,48, K_2O - 0,07, SiO_2 - 0,95, MgO - 0,50, CaO - 2,70, Fe_2O_3 - 1,42, Al_2O_3 - 1,97, P_2O_5 - <0,1, Zn - 53,76, Ni - 0,18, Cu - 37,70, Cr - 0,083, V - 0,006.

Методом инфракрасной спектроскопии в образцах были определены общая сера и углерод, %масс.: $S_{общая}$ – бронза (1231а) - 0,14, бронза (1231б) - 0,029, $S_{общий}$ – бронза (1231а) - 0,54, бронза (1231б) - 0,071; $S_{общая}$ – латунь (1232а) - 0,024, латунь (1232б) - <0,01, $S_{общий}$ – латунь (1232а) - 0,073, латунь (1232б) - 0,034.

В таблице 1 представлены результаты определения фазового состава истертых образцов латуни (La) и бронзы (Br) методом рентгенофазового анализа.

Таблица 1 – Результаты фазового состава истертых образцов шлама латуни и бронзы методом рентгенофазового анализа

Table 1 – Results of the phase composition of worn samples of brass and bronze sludge by X-ray phase analysis

Лабо- ратор- ный № пробы	Наиме- нование образца	Фазовый состав	Содер- жание, % масс
1231а	La	ZnO	75
		$ZnAl_2O_4$	9
		Zn_2SiO_4	6
		CuO	1
		$CuZn$	3
		Cu_3Zn	6
1232а	Br	ZnO	33
		SiO_2	20
		Al_2O_3	9
		$Ni_7Cu_3Zn_{10}$	15
		$Zn_2(SiO_4)$	4
		$CuAl_2O_4$	19
1231б	La	Cu_3Zn	66
		$Fe_{6,8}Zn_{3,2}$	12
		Zn	2
		ZnO	8
		$CuCrO_2$	12
1232б	Br	ZnO	16
		Cu_2NiZn	33
		Co_3ZnC	41
		$Zn(Al_{1,9}Fe_{0,1})O_4$	7
		$Cu_3Fe_2(SeO_3)_6$	2
		Cu_5Zn_8	1
		Cu_3Ge	1

Для получения сравнительных результатов анализа металлов меди и цинка, выделенных кислотным выщелачиванием из латунных и бронзовых шлаков был использован рентгенофазовый анализ (РФА). Результаты

определения компонентного состава исходных металлических шламов: бронза (без прокаливания): Cu 54 %, Zn 34 %, Sn 5 %, Pb 6 %, бронза (с прокаливанием 1 ч): Cu 31 %, Zn 56 %, Sn 1,5 %, Pb 4 %, бронза (с прокаливанием 8 ч): Cu 26 %, Zn 62 %, Sn 1,3 %, Pb 4 %, латунь (без прокаливания): Cu 19 %, Zn 76 %, Pb 1,8 %, латунь (с прокаливанием 1 ч): Cu 20 %, Zn 70 %, Pb 6 %, латунь (с прокаливанием 8 ч): Cu 15 %, Zn 79 %, Pb 2,4 %.

Рентгенофазовый анализ выявил, что латунный и бронзовый шламы, в основном состоят из сплавов меди с цинком. Состав металлических ломов многокомпонентный, в их входят соединения алюминия, железа, хрома, свинца.

Один из способов извлечения меди и цинка из шлаков - это процесс выщелачивания. При использовании серной кислоты или ее производных, а также аммиачных растворов в качестве выщелачивателя происходит перевод металла в раствор. Окисленные медные руды плохо подходят для обогащения, поэтому их обработка в основном осуществляется с применением гидрометаллургических методов.

Основная схема гидрометаллургической обработки сырья включает три основные операции: выщелачивание, подготовка растворов и извлечении металла из раствора. Цель выщелачивания – перевод извлекаемого металла в раствор путем обработки исходного сырья определенным растворителем, способным эффективно растворять только данный металл.

В качестве растворителей при выщелачивании медьсодержащего сырья используют разбавленную серную кислоту, подкисленные серной кислотой растворы сульфата железа, а также аммиачные растворы [13, 14].

Cu медленно реагирует с HCl и NH₄OH. При взаимодействии с HCl образуются хлориды, трудноудаляемые из смеси. При использовании HNO₃ в результате взаимодействия с Cu происходит выделение оксидов азота в виде «лисий хвоста» (NO_x) и для их удаления потребуются дополнительная каталитическая очистка выделяющихся газов от NO_x.

В качестве способа выщелачивания был выбран сернокислотный, т.к. он является более эффективным, дает меньше побочных продуктов, и не требует дополнительных вложений на их переработку.

Перед проведением процессов агитационного выщелачивания лом латуни подвергался предварительной обработке, состоящей из процессов:

- измельчения латунного шлама (в случае необходимости, в зависимости от партии лома);
- классификации шлама на сите с размером 0,315 мм;
- прокаливания в течение 8 ч при 600 °С.

После этого обожженный продукт подвергался выщелачиванию.

В результате взаимодействия меди и цинка с серной кислотой выделяются металлические медь и цинк и образуется раствор сульфатов меди и цинка, которые можно использовать как электролиты для

нанесения покрытий и выделения металлических порошкообразных меди и цинка.

Для выщелачивания меди и цинка из лома латуни рекомендуется использовать два способа. При первом способе «горячий метод» для повышения скорости выщелачивания и снижения затрат на предварительный нагрев смеси используется концентрированная серная кислота. За счет выделения тепла повышается температура выщелачивания до требуемой температуры 80 °С, и за счет разбавления водой концентрация кислоты снижается до 18-25 %. При температуре 80 °С в растворе образуются моногидрат сульфата цинка (ZnSO₄•H₂O) и гидратная медь. Для эффективного извлечения меди из лома, содержащего значительное количество примесей в раствор вводят 9-15 % раствор перекиси водорода. Соотношение между ломом и концентрированной серной кислотой, составляющее 1:1 является оптимальным для обеспечения максимального растворения меди. Процесс проводят при непрерывном перемешивании раствора.

Во втором способе «холодный метод» был использован 0,5М раствор серной кислоты. Выщелачивание проводилось при 20 °С при перемешивании раствора. Соотношение между ломом и серной кислотой поддерживалось 1:6-7.

Образовавшаяся в начале выщелачивания обоими способами металлическая медь представляет собой бурый порошок с вкраплениями металлического цинка (рис. 1).

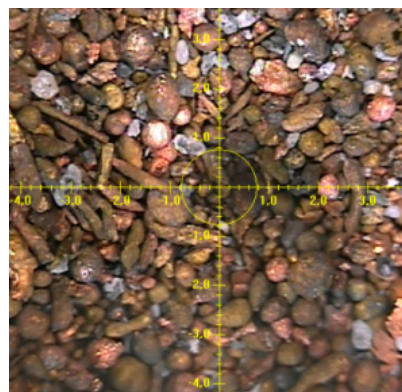


Рис. 1 – Снимок металлической меди, полученной после выщелачивания лома латуни серной кислотой и перекисью водорода «горячий метод»

Fig. 1 – Snapshot of metallic copper obtained after leaching brass scrap with sulfuric acid and hydrogen peroxide "hot method"

РФА было определено, что медь, выделенная «горячим методом» состоит из Cu 84 %масс., Zn 14 %масс., при использовании «холодного метода» из Cu 58 %масс., Zn 39 %масс. (рис. 2).

В ходе выщелачивания обоими способами образовавшийся осадок (кек) представляет собой серый порошок, состоящий из сульфата цинка и примесей.

Содержание меди зависит от метода выщелачивания. Состав кека, полученный «горячим

методом» – Cu 11 %масс., Zn 62 %масс., «холодным методом» – Cu 30 %масс., Zn 44 %масс. (рис. 3).

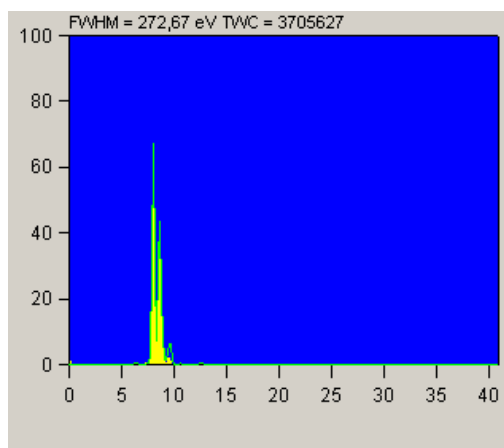


Рис. 2 – Энергетический спектр количественного определения состава металлической меди, полученной после выщелачивания лома латуни серной кислотой

Fig. 2 – Energy spectrum of quantitative determination of composition of metallic copper obtained after brass leaching with sulfuric acid

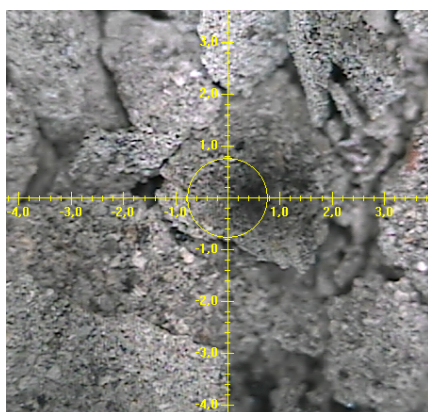


Рис. 3 – Осадок-шлам (кек) после промывки суспензии – «горячий метод»

Fig. 3 – Sediment-sludge (cake) after suspension washing - "hot method"

Промывные воды, образовавшиеся в ходе выщелачивания можно повторно направлять на выщелачивание или на подготовку растворов.

При растворении бронзы в горячей концентрированной серной кислоте, образуются сульфаты меди, цинка и олова, также могут образоваться и кислые соли.

Условия выщелачивания бронзы идентичны условиям выщелачивания латуни.

РФА было определено, что медь, выделенная «горячим методом» состоит из Cu 81 %масс., Zn 15 %масс., Sn 1,1 %масс.. Состав кек – Cu 11 %масс., Zn 70 %масс.

После удаления нерастворившейся части меди и цинка (первая фильтрация) в растворе при понижении температуры образуется взвесь. Методом РФА определено, что взвесь по химическому составу состоит из олова (Sn 59-70 %масс.). Для ее удаления

требуется повторная фильтрация раствора, т.к. при дальнейшем его использовании в качестве электролита олово отрицательно влияет на электролиз. Образовавшийся на фильтре осадок олова промывается водой и сушится при 80 °С.

Образовавшиеся в ходе кислотного выщелачивания латуни и бронзы обоими методами растворы после фильтрации можно использовать как электролиты для электрохимического восстановления меди и цинка.

Анализ состава растворов после фильтрации показал, что он содержит сульфата меди – 309,4 г/л, сульфата цинка – 352,5 г/л, свободной серной кислоты 54,4 г/л. Из полученных данных следует, что раствор может быть использован в качестве электролита для нанесения покрытий и выделения металлической меди, так как его состав отвечает стандартному электролиту меднения ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 200-250 г/л, H_2SO_4 50-70 г/л) [15].

Для выделения металлической меди электролиз проводят в течение 2 ч при плотности тока 0,1-0,5 А/дм² до обесцвечивания электролита. аноды – хромированная сталь или свинец 98-99 % чистоты. Катод – медная пластин. Состав электроосажденной меди – Cu 98-100 % масс..

После этого из этого же электролита проводится восстановление цинка на медной пластинке. Плотность тока 5 А/дм², время электролиза 30 мин при перемешивании. Малое время электролиза связано с тем, что во время электролиза наблюдается значительное дендритообразование по краям катода, и с течением времени дендриты попадают в электролит. На поверхности медной пластины образовался темный металлический налет. Состав электроосажденного цинка – Zn 91 %масс., Cu 6,5 %масс..

На рис. 4 показаны снимки меди и цинка, электроосажденных из электролитов, полученных после выщелачивания бронзы «холодным методом».

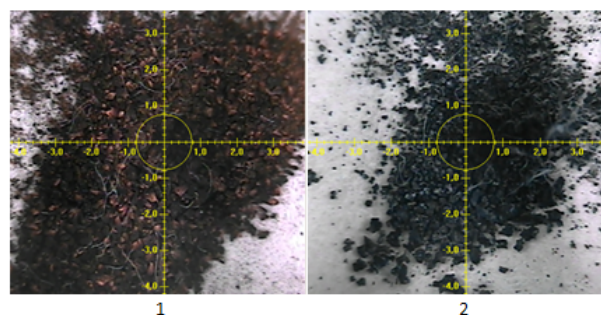


Рис. 4 – Металлическая медь (1) и цинк (2), полученные электролизом из электролита после выщелачивания лома бронзы серной кислотой «холодным методом»

Fig. 4 – Metallic copper (1) and zinc (2) obtained by electrolysis from electrolyte after leaching of bronze scrap with sulfuric acid by the "cold method"

Закключение

В лабораторных условиях разработаны способы получения образцов соединений цинка и меди: «горячий» и «холодный» из лома латуни и бронзы. В

качестве способа выщелачивания был выбран серноокислотный, агитационный.

По схеме «горячего» выщелачивания (80 °С) процесс растворения происходит 18-25% серной кислотой, образующейся при разбавлении исходной концентрированной кислоты и воды, входящей в раствор 15 % перекиси водорода, используемой для удаления примесей железа в латуни и бронзы.

При выщелачивании латуни, выделяющаяся химическим осаждением металлическая медь состоит из 84 % Cu, 14% Zn, твердый осадок – 11 % Cu, 62 % Zn.

При выщелачивании бронзы металлическая медь состоит из 81 % Cu, 15% Zn, твердый осадок – 11 % Cu, 70 % Zn. При выщелачивании бронзы кроме меди и цинка из раствора (фильтрата) при его охлаждении осаждается Sn с содержанием 70 %.

При электровосстановлении из электролитов осаждается металлическая медь с содержанием основного веществ 99 %.

По схеме «холодного» выщелачивания (25 °С) для растворения используется 0,5М раствор серной кислоты.

При выщелачивании латуни, выделяющаяся химическим осаждением металлическая медь состоит из 58 % Cu, 39% Zn, твердый осадок – 30 % Cu, 44 % Zn.

При электровосстановлении осаждается металлическая медь с содержанием основного веществ 99 %, металлический цинк с содержанием основного веществ 91 %, и частично 6,5 % меди.

Образующиеся в ходе промывки осадков растворы могут быть возвращены на разбавление кислот и промывных вод.

Литература

1. М.С. Доронина, Ю.А. Карпов, В.Б. Барановская, С.И. Лолейт, *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, **6**, 82, 70-80 (2016).
2. С.С. Набойченко [и др.]. *Процесс и аппараты цветной металлургии: учебник для вузов*. ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2005. 700 с.
3. Г.А. Колобов, В.Н. Бредихин, В.М. Чернобаев. *Сбор и обработка вторичного сырья цветных металлов: учебник для вузов*. Металлургия, Москва, 1992. 288 с.
4. С.Г. Мамяченков, О.С. Анисимова Б.В. Колмачихин, Э.Б. Хазиева, *Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований* (Екатеринбург, июнь 5-9, 2017). Тезисы. С.384-387.
5. Н.Е. Агарова, Л.М. Яковлева, А.С. Монахов, А.Р. Давлетшин, Е.С. Захаров. *Научно-практическая конференция с международным участием и элементами школы молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР»*, (Екатеринбург, октябрь 6-9, 2020). Статья. С.361-364.
6. ИТС 3-2015 *Производство меди*. Бюро НДТ, Москва, 2015. 353 с.
7. Е.С. Кондратьева, А.Ф. Губин, В.А. Колесников, *Металлургия цветных металлов*, **2**, 29-35 (2017).
8. И.Ф. Худяков [и др.]. *Технология вторичных цветных металлов: учебник для вузов*, Металлургия, Москва, 1981. 280 с.

9. Г.А. Колобов, С.Г. Грищенко, В.И. Пожуев, *Цветная металлургия (Физико-химические и технологические основы): Учебное пособие*, Издательство ЗГИА, Запорожье, 2010. 330 с.
10. Чиркст Д.Э., Чистяков А.А., Черемисина О.В. *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*, **5**, 34-37 (2008).
11. Д.В. Валуев, Р.А. Гизатуллин, *Технология переработки металлургических отходов: учебное пособие*, Томский политехнический университет, Томск, 2012. 196 с.
12. Латуны и бронза: отличия, состав, что лучше, характеристики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://met-all.org/cvetmet-splavy/bronza/latun-bronza-otlichiya-sostav-cto-luchshe.html>, свободный.
13. М.А. Меретуков, К.И. Струков, *Цветные металлы*, **1**, 18-24 (2024).
14. В.В. Максимов, А.Ю. Логинова, *Приоритетные научные направления: от теории к практике*, **7**, 123-129 (2013).
15. *Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник*. В 2-х томах /Под ред. М.А. Шлугера, Машиностроение, Москва, 1985. –Т.1. 240 с.

References

1. M.S. Doronina, Y.A. Karpov, V.B. Baranovskaya, S.I. Loleit, *Zavodskaya laboratoria. Diagnostics of materials*, **6**, 82, 70-80 (2016).
2. S.S. Naboychenko [et al]. *Process and apparatuses of non-ferrous metallurgy: textbook for universities*. GOU VPO UGTU-UPI, Ekaterinburg, 2005. 700 p.
3. G.A. Kolobov, V.N. Bredikhin, V.M. Chernobaev. *Collection and processing of secondary raw materials of non-ferrous metals: textbook for universities*. Metallurgy, Moscow, 1992. 288 p.
4. S.G. Mamyachenkov, O.S. Anisimova, B.V. Kolmachikhin, E.B. Khazieva, *Fundamental research and applied development of processes of processing and utilisation of technogenic formations* (Ekaterinburg, June 5-9, 2017). Abstracts. P.384-387.
5. N.E. Agarova, L.M. Yakovleva, A.S. Monakhov, A.R. Davletshin, E.S. Zakharov. *Scientific and practical conference with international participation and elements of the school of young scientists 'Prospects of development of metallurgy and mechanical engineering using completed fundamental research and R&D'*, (Ekaterinburg, October 6-9, 2020). Article. P.361-364.
6. ITS 3-2015 *Copper Production*. Bureau of BAT, Moscow, 2015. 353 p.
7. E.S. Kondratyeva, A.F. Gubin, V.A. Kolesnikov, *Metallurgy of non-ferrous metals*, **2**, 29-35 (2017).
8. I.F. Khudyakov [et al]. *Technology of secondary non-ferrous metals: textbook for universities*, Metallurgy, Moscow, 1981. 280 c.
9. G.A. Kolobov, S.G. Grishchenko, V.I. Pozhuev, *Non-ferrous metallurgy (Physico-chemical and technological bases):Textbook*, ZGIA Publishing House, Zaporozhye, 2010. 330 p.
10. Chirkst D.E., Chistyakov A.A., Cheremisina O.V. *Izvestiya vysshee obrazovaniya vysshee obrazovaniya [Izvestia of higher educational institutions. Non-ferrous metallurgy]*, **5**, 34-37 (2008).
11. D.V. Valuev, R.A. Gizatullin, *Technology of metallurgical waste processing: textbook*, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 2012. 196 p.
12. Brass and bronze: differences, composition, what is better, characteristics [Electronic resource]. - Access mode: <https://met-all.org/cvetmet-splavy/bronza/latun-bronza-otlichiya-sostav-cto-luchshe.html>, free.
13. M.A. Meretukov, K.I. Strukov, *Tsvetnye metalli*, **1**, 18-24 (2024).

14. V.V. Maksimov, A.Yu. Loginova, *Priority scientific directions: from theory to practice*, 7, 123-129 (2013).

15. *Galvanic coatings in mechanical engineering. Reference book*. In 2 volumes /Edited by M.A. Shluger, Mashinostroenie, Moscow, 1985. -V.1. 240 p.

© **С. Т. Ермуханова** – аспирант, кафедра технологии неорганических веществ и материалов (ТНВиМ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, svetok_88-88@mail.ru; **А. И. Хацринов** – д.т.н., проф., зав. каф. ТНВиМ, КНИТУ, khatsrin@mail.ru; **С. В. Водопьянова** – доцент кафедры ТНВиМ КНИТУ, vod-sveta@yandex.ru; **А. З. Сулейманова** – старший преподаватель кафедры ТНВиМ КНИТУ, alsu-sulejmanova@yandex.ru.

© **S. T. Yermukhanova** – PhD-student, Department of Inorganic Substances and Materials Technology (ISMT), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, svetok_88-88@mail.ru; **A. I. Khatsrinov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Head of the ISMT department, KNRTU, khatsrin@mail.ru; **S.V. Vodopyanova** – Associate Professor of the ISMT department, KNRTU, vod-sveta@yandex.ru; **A. Z. Sulejmanova** – Senior lecturer of the ISMT department, KNRTU, alsu-sulejmanova@yandex.ru