

EDN: XTXGAQ

УДК 669.054.8

Effect of Ultrasonic Treatment on Sulphuric Acid Leaching of Indium and Tin from Spent Displays

Elvira B. Kolmachikhina*, **Olga B. Kolmachikhina,**
Zamira M. Golbizoda and Yana A. Yankina
*Laboratory of Advanced Technologies for Complex Processing
of Mineral and Technogenic Raw Materials
of Nonferrous and Ferrous Metals,
Ural Federal University, named after the first President
of Russia, B. N. Yeltsin
Yekaterinburg, Russian Federation*

Received 19.11.2023, received in revised form 19.02.2024, accepted 10.05.2024

Abstract. The influence of ultrasonic treatment, duration, concentration of sulfuric acid and temperature on the indices of leaching of indium and tin from the surface of glass substrates of used liquid crystal displays has been studied. The positive effect of ultrasonic treatment, allowing to reduce the leaching duration up to 20 min, the concentration of sulfuric acid (0.2 M) and the temperature (333 K) is established. The partial orders of reactions of dissolution of indium and tin oxides by sulfuric acid and the values of apparent activation energy, including the use of ultrasonic treatment, were calculated. Acoustic influence on the pulp during leaching allowed to eliminate diffusion difficulties in the dissolution of tin oxide and kinetic – in the decomposition of indium oxide, contributing to the transition of the process to a mixed regime.

Keywords: ultrasound, leaching, sulfuric acid, display, apparent activation energy, reaction order.

Acknowledgements. The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 22–79–00129, <https://rscf.ru/project/22–79–00129>.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: e.b.khazieva@urfu.ru

Citation: E. B. Kolmachikhina, O. B. Kolmachikhina, Z. M. Golbizoda, Ya. A. Yankina. Effect of ultrasonic treatment on sulphuric acid leaching of indium and tin from spent displays. J. Sib. Fed. Univ. Chem., 2024, 17(2), 257–267. EDN: XTXGAQ



Влияние ультразвуковой обработки на сернокислотное выщелачивание индия и олова из отслуживших дисплеев

Э. Б. Колмачихина, О. Б. Колмачихина,
З. М. Голибзода, Я. А. Янкина

*Лаборатория перспективных технологий комплексной переработки
минерального и техногенного сырья цветных и черных металлов,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента РФ Б. Н. Ельцина»
Российская Федерация, Екатеринбург*

Аннотация. Изучено влияние ультразвуковой обработки, продолжительности, концентрации серной кислоты и температуры на показатели выщелачивания индия и олова с поверхности стеклянных подложек отслуживших жидкокристаллических дисплеев. Установлен положительный эффект ультразвуковой обработки, позволяющий уменьшить продолжительность выщелачивания до 20 мин, концентрацию серной кислоты (0,2 М) и температуру (333 К). Рассчитаны частные порядки реакций растворения оксидов индия и олова по серной кислоте и величины кажущейся энергии активации, в том числе при использовании ультразвуковой обработки. Акустическое воздействие на пульпу при выщелачивании позволило устранить диффузионные затруднения при растворении оксида олова и кинетические – при разложении оксида индия, способствуя переходу процесса в смешанный режим.

Ключевые слова: ультразвук, выщелачивание, серная кислота, дисплеи, кажущаяся энергия активации, порядок реакции.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–79–00129, <https://rscf.ru/project/22–79–00129>.

Цитирование: Колмачихина Э. Б., Колмачихина О. Б., Голибзода З. М., Янкина Я. А. Влияние ультразвуковой обработки на сернокислотное выщелачивание индия и олова из отслуживших дисплеев. Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия, 2024, 17(2). С. 257–267. EDN: XTXGAQ

1. Введение

За последние 10 лет объемы образования электронного лома увеличились на 60 % [1], и этот рост вряд ли в ближайшие годы замедлится. Повышенный спрос на электронику для работы,

получения образования и развлечений в будущем приведет к формированию ещё больших объемов отслужившей техники.

Многокомпонентность электронных устройств осложняет их переработку. При утилизации отслужившей техники необходима ручная разборка и применение специального оборудования для сортировки и классификации. Несмотря на сложности сбора и утилизации электронных устройств, их переработка необходима для минимизации экологического урона и возвращения в производственные циклы ценных компонентов. Например, при переработке отслуживших мониторов возможно выделить пластик, стекло, сталь, медь, а также органические соединения [2–7]. Кроме того, в составе дисплеев мониторов также имеются небольшие количества индия и олова в виде оксида индия-олова ((90 % In_2O_3 , 10 % SnO_2 , indium-tin oxide, ИТО). ИТО имеет широкий спектр применения благодаря своим уникальным свойствам: электропроводности, оптической прозрачности и химической устойчивости. ИТО используется в составе дисплеев различных видов мониторов, сенсорных панелей, солнечных батарей и др.

Индий, основной компонент ИТО, является редким рассеянным элементом, который не имеет собственных месторождений и добывается чаще всего совместно с цинковыми рудами. Известно, что имеющихся запасов индия в недрах хватит на ближайшие 10 лет текущей выработки [8]. Отслужившие дисплеи мониторов в будущем могут стать альтернативным источником индия.

Выделение индия и олова из дисплеев отслуживших мониторов может осуществляться пиро- и гидрометаллургическими способами. Пирометаллургические методы заключаются в восстановлении ИТО углеродом или водородом, в результате получают индий- и оловосодержащие возгоны [9–11]. Гидрометаллургические методы включают выщелачивание индия и олова в растворах кислот (серная, соляная, азотная и др.) и щелочей [12–18]. Интенсифицировать процессы выщелачивания можно с помощью повышения концентрации кислот [19], температуры [12], введения окислителей и восстановителей [20], а также ультразвуковой обработки [21–23]. Применение ультразвука позволяет проводить выщелачивание в стандартных реакторах, при этом не требуется введения дополнительных реагентов.

Ультразвуковая обработка может оказывать термический, механический и сонохимический эффекты. Термические эффекты связаны со схлопыванием кавитационных пузырьков, что приводит к образованию горячих точек, где резко повышается температура (до 10000 К) и давление (10000 атм), образуя трещины на поверхности частиц и ускоряя массообмен и диффузию растворителей, что повышает извлечение ценных металлов [24]. Сонохимический эффект проявляется образованием радикалов H^+ и OH^- с высокой реакционной способностью, которые образуются в результате термолитиза воды в локализованных горячих точках. Механические эффекты приводят к образованию микротрещин или устраняют пассивирующий слой на поверхности частиц, ускоряя процесс доставки растворителя к реакционной поверхности.

Цель данной работы – исследование влияния ультразвуковой обработки, продолжительности, концентрации серной кислоты и температуры на физико-химические закономерности выщелачивания ИТО с поверхности измельченных стеклянных подложек отслуживших жидкокристаллических дисплеев.

2. Методика эксперимента

Материалы, оборудование и методы исследования. Стеклообразные подложки отслуживших жидкокристаллических дисплеев предварительно промывали водой, сушили на воздухе, затем выдерживали при температуре 463 К для размягчения и удаления пленки ручным способом. Очищенные стеклянные подложки измельчали в стержневой мельнице. Выделяли фракцию –1 мм измельченного материала методом отсева. Данную фракцию использовали для проведения дальнейших экспериментов. После тщательного усреднения материала отбирали представительную пробу методом квартования для последующего химического анализа на атомно-абсорбционном спектрофотометре (ААС) novAA 300, Analytik Jena, (Германия). Гранулометрический состав материала определяли с использованием лазерного дифракционного анализатора размера частиц HELOS&RODOS (Symptec GmbH, Германия). Морфологию образцов измельченного материала и его химический состав изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6390LA, снабженного системой энергодисперсионного микроанализа JED-2300.

Основная масса материала (>85 %) включала частицы неправильной формы крупностью менее 300 мкм (рис. 1). Согласно данным элементного анализа и ранее проведенным исследованиям [25, 26] в материале преобладали оксиды алюминия, кремния и кальция. На поверхности стекла (точка 1 рис. 1) присутствовали соединения индия, олова, а на поверхности токопроводящих дорожек – молибдена (точки 3, 4 рис. 1). Измельченные стеклянные подложки дисплеев содержали, мг/кг: In 174,8, Sn 1,7.

В экспериментах использовали серную кислоту H_2SO_4 (хч). Исходные растворы серной кислоты готовили разбавлением дистиллированной водой при перемешивании на магнитной мешалке.

Ультразвуковую обработку (УЗО) проводили с помощью аппарата УЗТА-0,1/28-О (ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», г. Бийск, Россия), оснащенного излучателем погружного типа, при частоте $28 \pm 2,5$ кГц и интенсивности ультразвукового воздействия (I) 120–300 Вт/см².

Выщелачивание измельченных стекол. Опыты по выщелачиванию проводили в термостатируемом реакторе объемом 0,5 дм³ при температуре T 298–353 К, продолжительности t

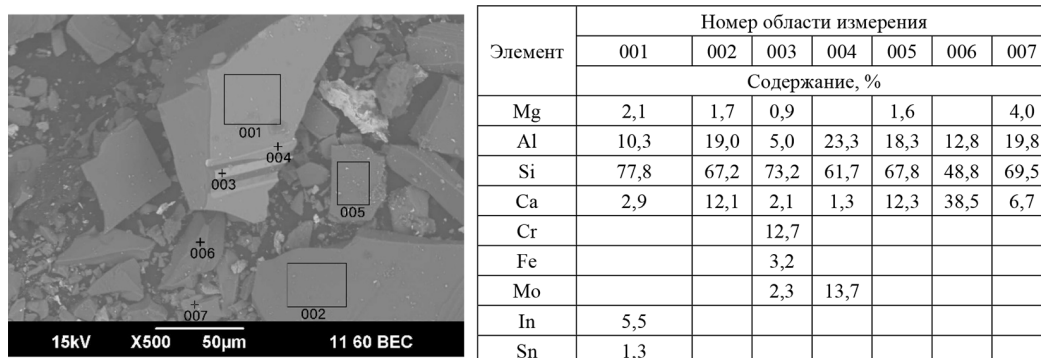


Рис. 1. СЭМ-изображение и элементный состав измельченных стеклянных подложек дисплеев

Fig. 1. SEM image and elemental composition of crushed glass display substrates

10–60 мин, концентрации серной кислоты 0,05–0,5 М, соотношении жидкого и твердого Ж: Т = 10: 1 см³/г.

Растворы серной кислоты с заданной концентрацией заливали в реактор, герметизировали, нагревали до заданной температуры при постоянном перемешивании. Затем в реактор погружали ультразвуковой излучатель на фиксированную глубину, загружали навеску материала (20 г), включали ультразвуковой генератор, далее автоматически поддерживали температуру пульпы с точностью ± 2 К.

Пульпу после выщелачивания фильтровали, кек промывали дистиллированной водой. Далее кек подвергали кислотной обработке при 363 К в 20 %-ном растворе соляной кислоты в течение нескольких часов для полного перехода металлов в раствор. После кислотной обработки кек также фильтровали и промывали дистиллированной водой. Пробы, отобранные в процессе выщелачивания, фильтраты после выщелачивания и кислотной обработки и промывные воды анализировали на содержание ионов индия и олова с помощью ААС (novAA300, Analytik Jena, Германия). Общее извлечение индия и олова (α_{Me}) оценивали по их содержанию в фильтратах и промывных водах.

Обработка экспериментальных данных. Степень извлечения индия и олова оценивали, учитывая объемы отбираемых проб по формуле (1).

$$\alpha_{Me}^i = \frac{C^i \cdot (V_{исх.} - V_{пробы} \cdot (i-1)) + \sum_{j=1}^{i-1} (C^j \cdot V_{пробы})}{G_{Me}} \cdot 100, \quad (1)$$

где α_{Me}^i – степень извлечения металла к моменту отбора i -той пробы, %; C^i – концентрация металла в i -той пробе, г/дм³; $V_{пробы}$ – объем пробы, дм³; $V_{исх.}$ – исходный объем раствора выщелачивания, дм³; G_{Me} – масса металла в навеске материала, г.

Кинетические характеристики (частные порядки реакций, кажущиеся энергии активации) определяли путем нахождения мгновенной скорости выщелачивания в начальный момент времени (v_0) через построение касательных к кривым $\alpha_{Me} = f(\tau)$. Касательные проводили через точку начала координат.

3. Результаты исследования и их обсуждение

В составе ИТО наряду с In₂O₃ и SnO₂ также может находиться SnO, содержание которого достигает 7 %. Известно, что SnO₂ малоактивен в разбавленных кислотах при стандартных условиях, поэтому в исследуемой системе, вероятнее всего, растворяется Sn O. Процесс серно-кислотного выщелачивания ИТО можно описать как отдельные процессы растворения оксида индия и оксида олова (II):



Влияние ультразвуковой обработки на извлечение индия и олова

Предварительные эксперименты, проведенные без ультразвуковой обработки (УЗО) пульпы, показали, что в первые 10–20 мин выщелачивания происходило интенсивное растворение

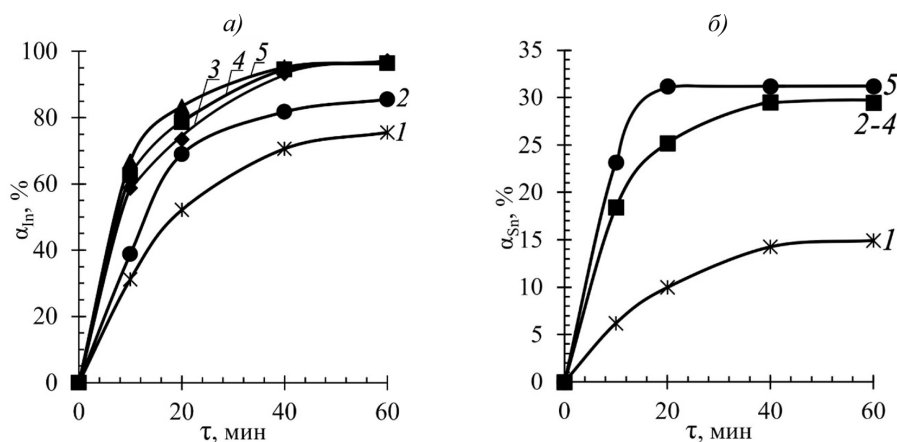


Рис. 2. Влияние продолжительности выщелачивания на извлечение индия (а) и олова (б) при различной интенсивности обработки пульпы ультразвуком: T 333 К, Ж: $T=10$: $1 \text{ cm}^3/\text{г}$, $C_{\text{H}_2\text{SO}_4}=0,1 \text{ M}$, I , Вт/см²: 1–0; 2–120; 3–180; 4–240; 5–300.

Fig. 2. Effect of leaching duration on the recovery of indium (a) and tin (b) at different intensities of ultrasonic pulp treatment: T 333 K, L : $T=10$: $1 \text{ cm}^3/\text{g}$, $C_{\text{H}_2\text{SO}_4}=0,1 \text{ M}$, I , W/cm²: 1–0; 2–120; 3–180; 4–240; 5–300.

индия и олова, после чего скорость процесса снижалась из-за уменьшения количества непрореагировавшего ИТО и концентрации ионов H^+ (кривая 1 на рис. 2а, б). Извлечение индия и олова за 60 мин выщелачивания в отсутствие УЗО составило 76 и 15 % соответственно.

Введение УЗО позволяло значительно повысить извлечение металлов, причем заметный положительный эффект озвучивания отмечали при интенсивности ультразвука 120–180 Вт/см²: извлечение индия повышалось до 86–97 %, олова – до 29 %. Дальнейшее повышение интенсивности УЗО не приводило к значительному увеличению извлечения металлов, что связано с ослаблением кавитационных процессов ввиду чрезмерного увеличения радиуса кавитационных пузырьков [27]. Поэтому дальнейшие эксперименты с УЗО пульпы проводили при $I = 180 \text{ Вт/см}^2$.

Влияние концентрации серной кислоты на извлечение индия и олова

Концентрация ионов H^+ , наряду с температурой, является важным параметром, определяющим скорость растворения ИТО. При низких концентрациях серной кислоты (0,05–0,1 М) извлечение индия и олова за 60 мин достигало 42–75 и 5–15 % соответственно (рис. 3а, в). Увеличение концентрации кислоты до 0,2–0,5 М позволяло практически полностью извлечь индий ($\alpha_{\text{in}} = 98 \%$) и повысить извлечение олова до 25–53 % за 60 мин выщелачивания.

Положительный эффект УЗО на извлечение индия наиболее сильно проявлялся при низких концентрациях серной кислоты (0,05–0,1 М): α_{in} повышалось на 22–45 % за 60 мин выщелачивания (рис. 3б, з). При $C_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 0,2\text{--}0,5 \text{ M}$ за 10 мин выщелачивания α_{in} достигало 76–86 %, полное извлечение индия происходило спустя 40 мин. Под воздействием УЗО также увеличивалась интенсивность растворения олова: при $C_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 0,05\text{--}0,2 \text{ M}$ α_{Sn} повышалось в два раза, достигая 55 % ($\tau = 60 \text{ мин}$); при $C_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 0,5 \text{ M}$ α_{Sn} составляло 66 % ($\tau = 60 \text{ мин}$).

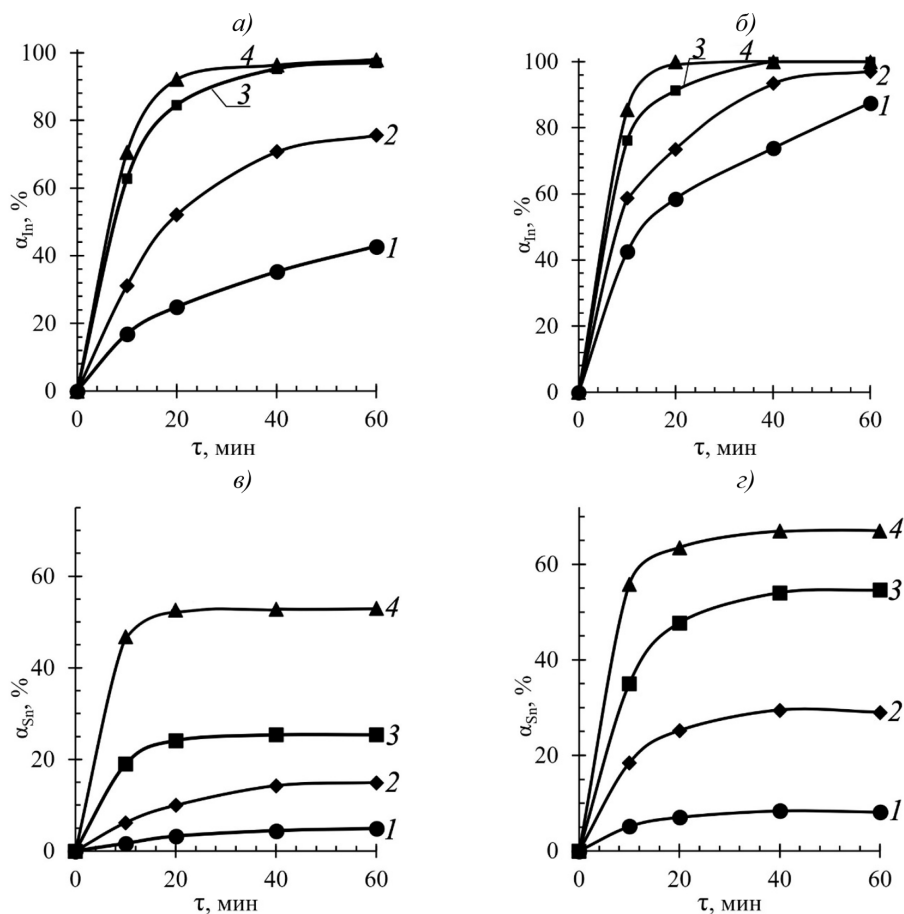


Рис. 3. Влияние продолжительности выщелачивания на извлечение индия (а, б) и олова (в, г) в отсутствие (а, в) и в присутствии (б, г) УЗО ($I = 180 \text{ Вт/см}^2$) при различных концентрациях серной кислоты: $T = 333 \text{ К}$, Ж: $T=10: 1 \text{ см}^3/\text{г}$, $\text{C}_{\text{H}_2\text{SO}_4}$, М: 1–0,05; 2–0,1; 3–0,2; 4–0,5.

Fig. 3. Effect of leaching duration on the recovery of indium (a, b) and tin (c, d) in the absence (a, c) and presence (b, d) of UST ($I = 180 \text{ W/cm}^2$) at different concentrations of sulfuric acid: $T = 333 \text{ K}$, $L: T = 10: 1 \text{ cm}^3/\text{g}$, $\text{C}_{\text{H}_2\text{SO}_4}$, M: 1–0,05; 2–0,1; 3–0,2; 4–0,5.

Частные порядки реакций растворения ИТО по концентрации H_2SO_4 определяли через угловые коэффициенты прямых, построенных в координатах $\lg v_0 - \lg C$ (рис. 4). При выщелачивании без УЗО частные порядки реакций растворения по концентрации серной кислоты составляли 0,67 и 1,4 для индия и олова соответственно, а при использовании УЗО – 0,35 и 1,13 соответственно.

Влияние температуры на извлечение индия и олова

Увеличение температуры выщелачивания с 298 до 353 К позволило повысить α_{In} с 13,6 до 96,5 % за 60 мин (рис. 5а). При использовании акустического воздействия уже при 313 и 333 К достигали $\alpha_{\text{In}} > 90\%$ за 60 и 40 мин соответственно (рис. 5б). При 353 К извлечение индия при использовании УЗО было сопоставимым с результатами, полученными без озвучивания. Наблюдаемое снижение эффективности ультразвука при повышении температуры связано

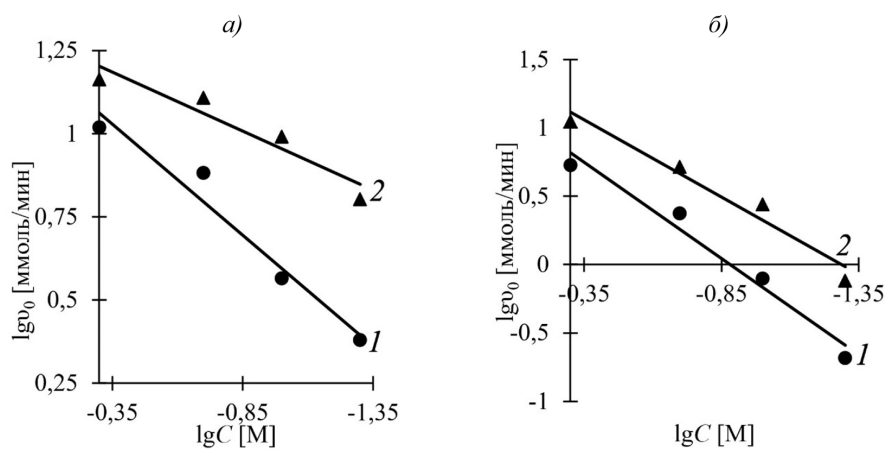


Рис. 4. Определение частных порядков реакций выщелачивания индия (а) и олова (б) по концентрации серной кислоты без использования (1) и с использованием (2) УЗО

Fig. 4. Determination of partial orders of indium (a) and tin (b) leaching reactions by sulphuric acid concentration without (1) and with the use of (2) UST

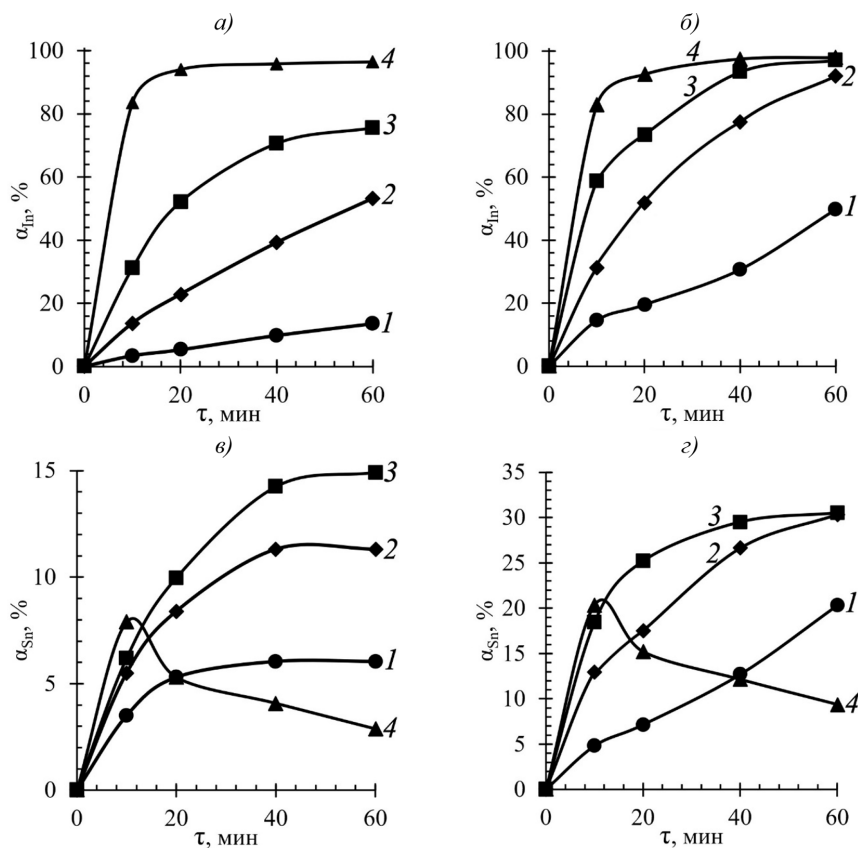


Рис. 5. Влияние продолжительности выщелачивания на извлечение индия (а, б) и олова (в, г) в отсутствие (а, в) и в присутствии (б, г) УЗО ($I = 180 \text{ Вт/см}^2$) при различных температурах: $C_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 0,1 \text{ М}$, Ж: $T = 10: 1 \text{ см}^3/\text{г}$, Т, К: 1–298; 2–313; 3–333; 4–353

Fig. 5. Effect of leaching duration on the recovery of indium (a, b) and tin (c, d) in the absence (a, c) and in the presence (b, d) of UST ($I = 180 \text{ W/cm}^2$) at different temperatures: $C_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 0.1 \text{ M}$, $L: T = 10: 1 \text{ cm}^3/\text{g}$, $T, \text{ K}: 1-298; 2-313; 3-333; 4-353$

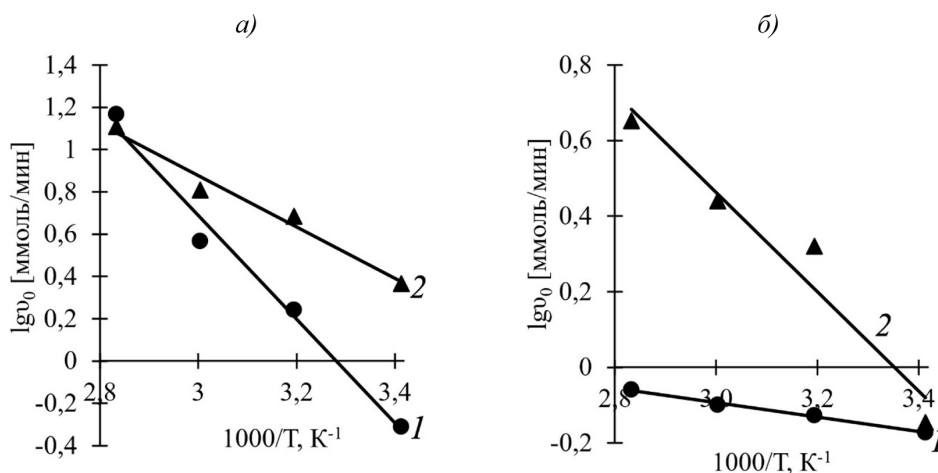


Рис. 6. Определение кажущейся энергии активации реакций выщелачивания индия (а) и олова (б) без использования (1) и с использованием (2) УЗО

Fig. 6. Determination of apparent activation energy of indium (a) and tin (b) leaching reactions without using (1) and with using (2) UST

со снижением поверхностного натяжения водного раствора и повышением давления насыщенного пара, что приводило к уменьшению скорости сжатия пузырька, а следовательно, и интенсивности ударных волн [28].

Выщелачивание олова также интенсифицировалось при увеличении температуры с 298 до 333 К: α_{Sn} повышалось с 6 до 15 % без УЗО, с 20 до 30 % с УЗО (рис. 5в, з). Однако при 353 К α_{Sn} стремительно уменьшалось после 10 мин, что, вероятнее всего, связано с гидролизом олова [29].

Рассчитанные величины кажущейся энергии активации реакций растворения оксида индия составили 46,9 (без УЗО) и 23,3 (с УЗО) кДж/моль, а для оксида олова – 3,65 (без УЗО) и 25,2 (с УЗО) кДж/моль. Полученные данные свидетельствуют о преимущественном влиянии диффузионных ограничений на растворение оксида олова без использования ультразвука. При озвучивании пульпы выщелачивание олова переходило в смешанный режим, что, вероятнее всего, связано с удалением акустическим потоком пассивирующего слоя с поверхности частиц. Выщелачивание индия без ультразвукового воздействия протекало в кинетическом режиме, УЗО позволяла интенсифицировать соударения ионов H^+ с кристаллической решеткой ИТО [30], за счёт чего растворение индия переходило в смешанный режим.

Заключение

Проведенные эксперименты по сернокислотному выщелачиванию индия и олова из отслуживших жидкокристаллических дисплеев позволили установить следующие закономерности:

1. Ультразвуковая обработка пульпы интенсифицировала процессы выщелачивания индия и олова из ИТО, позволяя извлекать более 90 и 50 % индия и олова соответственно за 20 мин выщелачивания при 333 К в 0,2 М растворе серной кислоты. Для достижения сопоставимых показателей выщелачивания без использования акустического воздействия необходимо увеличение продолжительности процесса свыше 40 мин либо увеличение исходной концентрации серной кислоты до 0,5 М.

2. Установлено, что использование ультразвука при выщелачивании ИТО наиболее эффективно при интенсивности 120–180 Вт/см².

3. Наиболее заметный положительный эффект ультразвуковой обработки проявлялся при низких концентрациях серной кислоты (0,05–0,1 М) и температуре до 333 К.

4. Показано, что при температуре 353 К после 10 мин выщелачивания развиваются процессы осаждения олова, связанные с его гидролизом.

5. Озвучивание пульпы позволяет устранить диффузионные затруднения при растворении оксида олова и кинетические – при разложении оксида индия.

Список литературы / References

- [1] <https://www.statista.com/topics/3409/electronic-waste-worldwide/#topicOverview>
- [2] Anić Vučinić, A.; Šimunić, S.; Radetić, L.; Presečki, I. Indium Recycling from Waste Liquid Crystal Displays: Is It Possible? *Processes*. 2023. 11, 1662.
- [3] Ferella F., Belardi G., Marsilii A., Michelis I., Vegliò F. Separation and recovery of glass, plastic and indium from spent LCD panels. *Waste Management*, 2017. 60, 569–581.
- [4] Wang Y., Wang R., Zhang C, Wang J. Full components recovery of organic matter and indium from discarded liquid crystal display panels. *Journal of Cleaner Production*, 2021. 299, 126862.
- [5] Góra J.; Franus M., Barnat-Hunek D., Franus W. Utilization of Recycled Liquid Crystal Display (LCD) Panel Waste in Concrete. *Materials*. 2019. 12, 2941.
- [6] Ueberschaar M., Schlummer M., Jalalpoor D., Kaup N., Rotter V. S. Potential and Recycling Strategies for LCD Panels from WEEE. *Recycling*. 2017. 2, 7.
- [7] Fontana D., Forte F., Carolis R., Grosso M. Materials recovery from waste liquid crystal displays: A focus on indium. *Waste Management*. 2015. 45, P. 325–333.
- [8] Illés I.B., Nagy S., Kékesi T. The recycling of pure metallic indium from waste LCD screens by a combined hydro-electrometallurgical method. *Hydrometallurgy*. 2022. 213, 105945.
- [9] Xu W., Chen X., Liu D., Jiang W., Yang B. Systematic thermodynamic and experimental studies for recovering indium and tin from indium tin oxide waste target with hydrogen. *Journal of Cleaner Production*. 2023. 139328.
- [10] He Y., Ma E., Xu Z. Recycling indium from waste liquid crystal display panel by vacuum carbon-reduction. *Journal of Hazardous Materials*. 2014. 268, 185–190.
- [11] Satoshi I., Maruyama K. Recoveries of Metallic Indium and Tin from ITO by Means of Pyrometallurgy. *High Temperature Materials and Processes*. 2011. 30(4), 317–322.
- [12] Park J. The Recovery of Indium Metal from ITO-scrap using Hydrothermal Reaction in Alkaline Solution. *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2011. 32(10), 3796–3798.
- [13] Lahtela V., Virolainen S., Uwaoma A., Kallioinen M., Kärki T., Sainio T. Novel mechanical pre-treatment methods for effective indium recovery from end-of-life liquid-crystal display panels. *Journal of Cleaner Production*. 2019. 230, 580–591.
- [14] Virolainen S., Huhtanen T., Laitinen A., Sainio T. Two alternative process routes for recovering pure indium from waste liquid crystal display panels. *Journal of Cleaner Production*. 2020. 243, 118599.
- [15] Rocchetti L., Amato A., Fonti V., Ubaldini S., de Michelis I., Kopacek B., Vegliò F., Beolchini F. Cross-current leaching of indium from end-of-life LCD panels. *Waste Management*. 2015. 42, 180–187.

- [16] Houssaine Moutiy E., Tran L.-H., Mueller K. K., Coudert L., Blais J.-F. Optimized indium solubilization from LCD panels using H₂SO₄ leaching. *Waste Management*. 2020. 114, 53–61.
- [17] Kato T., Igarashi S., Ishiwatari Y., Furukawa M., Yamaguchi H. Separation and concentration of indium from a liquid crystal display via homogeneous liquid–liquid extraction. *Hydrometallurgy*. 2013. 137, 148–155.
- [18] Lee C.-H., Jeong M.-K., Fatih Kilicaslan M., Lee J.-H., Hong H.-S., Hong S.-J. Recovery of indium from used LCD panel by a time efficient and environmentally sound method assisted HEBM. *Waste Management*. 2013. 33(3), 730–734.
- [19] Gu S., Fu B., Dodbiba G., Fujitaa T., Fang B. A sustainable approach to separate and recover indium and tin from spent indium–tin oxide targets. *RSC Advances*. 2017. 82, 52017–52023.
- [20] Qin J., Ning S., Fujita T., Wei Y., Zhang S., Lu S. Leaching of indium and tin from waste LCD by a time-efficient method assisted planetary high energy ball milling. *Waste Management*. 2021. 120, 193–201.
- [21] Chinnam R.K., Ujaczki É., O’Donoghue L. Leaching indium from discarded LCD glass: A rapid and environmentally friendly process. *Journal of Cleaner Production*. 2020. 277: 122868.
- [22] Zhang K., Li B., Wu Y., Wang W., Li R., Zhang Y.-N., Zuo T. Recycling of indium from waste LCD: A promising non-crushing leaching with the aid of ultrasonic wave. *Waste Management*. 2017. 64, 236–243.
- [23] Souada M., Louage C., Doisy J.-Y., Meunier L., Benderrag A., Ouddane B., Bellayer S., Nuns N., Traisnel M., Maschke U. Extraction of indium–tin oxide from end-of-life LCD panels using ultrasound assisted acid leaching. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018. 40, 929–936.
- [24] Bao S., Chen B., Zhang Y., Ren L., Xin C., Ding W., Yang S., Zhang W. A comprehensive review on the ultrasound-enhanced leaching recovery of valuable metals: Applications, mechanisms and prospects. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2023. 98, 106525.
- [25] Wang H.Y. A study of the effects of LCD glass sand on the properties of concrete. *Waste Management*. 2009. 29(1), 335–341.
- [26] Park K.-S., Sato W., Grause G., Kameda T., Yoshioka T. Recovery of indium from In₂O₃ and liquid crystal display powder via a chloride volatilization process using polyvinyl chloride. *Thermochimica Acta*. 2009. 493(1–2), 105–108.
- [27] Агранат Б.А., Кириллов О.Д., Преображенский Н.А., Хавский Н.Н., Якубович И.А. *Ультразвук в металлургии*. М.: Металлургия, 1969. 304 [Agranat B. A., Kirillov O. D., Preobrazhenskii N. A., Khavskii N. N., Yakubovich I. A. *Ultrasound in metallurgy*. Moscow. Metallurgiya, 1969. 304 (In Rus.)]
- [28] Котухов А.В., Красовский А. В., Шаплыко В. В., Дежкунов Н. В. Исследование зависимости активности акустической кавитации от температуры жидкости. *Доклады БГУИР*. 2015. 6, 36–40. [Kotukhov A. V., Krasovskii A. V., Shaplyko V. V., Dezhkunov N. V. Investigation of acoustic cavitation activity dependence on liquid temperature. *Doklady BGUIR*. 2015. 6, 36–40. (In Rus.)]
- [29] Rudnik E., Wincek D. Preliminary studies on hydrometallurgical tin recovery from waste of tin stripping of copper wires. *Metallurgy and Foundry Engineering*. 2017. 43(1), 7–20.
- [30] Bu X., Danstan J.K., Hassanzadeh A., Vakylabad A.B., Chelgani S.C. Metal extraction from ores and waste materials by ultrasound-assisted leaching -an overview. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2022. 9.