

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
ГНУ «ИНСТИТУТ ХИМИИ им. В.И. НИКИТИНА»**

На правах рукописи

ХОДЖАНАЗАРОВ Хайрулло Махмудхонович

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВИНЦОВОГО
БАББИТА Б(PbSb₁₅Sn₁₀) С ЛИТИЕМ, НАТРИЕМ И КАЛИЕМ**

**Специальность
2.6.17-Материаловедение (технические науки)**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Душанбе – 2023

Работа выполнена в лаборатории «Коррозионностойкие материалы» ГНУ «Институт химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана».

Научный руководитель: доктор химических наук, профессор, академик
Национальной академии наук Таджикистана
Ганиев Изатулло Наврузович

**Официальные
оппоненты:** **Амонзода Илхом Темур**
(Амонов Илхомджон Темурбоевич) –
доктор технических наук, доцент, ректор
Технологического университета Таджикистана

Олимов Насруддин Солехович
кандидата химических наук, доцента,
заведующий кафедрой «Общетехнических
дисциплин и машиноведения» Таджикского
государственного педагогического университета
имени С. Айни.

Ведущая организация: Горно-металлургического института
Таджикистана, кафедра «Общетехнических
дисциплин»

Защита состоится «25» сентября 2023 года в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 73.1.002.02 при ГНУ «Институт химии им. В.И.Никитина Национальной академии наук Таджикистана» по адресу:
Республика Таджикистан, 734063, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2. E-mail:
dissovet@ikai.tj

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ГНУ «Институт химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана» www.chemistry.tj.

Автореферат разослан: « ____ » _____ 2023 года

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат химических наук

Халикова Л.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Среди широко используемых материалов часто встречаются материалы, о которых у пользователей нет достаточной информации. Одним из таких материалов являются баббиты, которые представляют собой металлические сплавы на основе свинца и содержат небольшое количество легирующих элементов. Как в промышленности, так и в повседневной жизни они занимают очень важное место, их обуславливают уникальные сферы и области использования. Также, легированные свинцовые сплавы обладают высокими антифрикционными свойствами, что даёт возможность использовать их в производстве деталей и механизмов, работающих в критериях трения и скольжения. Основное преимущество свинцовых баббитов – это невысокая стоимость, которая часто является характеризующим критерием при выборе материала для решения определённых целей.

Баббит марки БТ (PbSb15Sn10Te0.2) имеет состав примерно такой же, как и баббит БН, но вместо никеля он содержит около 0,2 % теллура. Баббит БТ обладает большей вязкостью, чем баббит Б16 и поэтому может быть применён в подшипниках, испытывающих ударные нагрузки (в автомобильных и тракторных двигателях). Несмотря на высокий коэффициент трения, баббиты БТ нашли широкое применение благодаря своему свойству хорошо прирабатываться и удовлетворительной пластичности. После термической обработки пластичность баббита БТ значительно увеличивается, а твёрдость уменьшается.

В связи с активным развитием современной техники существует потребность в создании материалов, надёжно работающих в сложной комбинации силовых и температурных полей, при воздействии агрессивных сред и высоких давлений. Одним из эффективных путей решения этой задачи является создание конструкционных материалов, с повышенной коррозионно-стойкостью благодаря чему эти материалы приобретают качественно новые, зачастую уникальные свойства. Следует отметить, что разработка новых конструкционных материалов является, в настоящее время, ключевым направлением развития современного материаловедения.

Баббиты на основе свинца, предназначены для изготовления антифрикционного слоя в многослойных подшипниках скольжения для двигателей внутреннего сгорания, шатунных подшипников, вкладышей, упорных подшипников и другое. Данные сплавы обладают недостаточным уровнем коррозионной стойкости в агрессивных средах, что ограничивает области их использования.

В литературе нет сведений о физико-химических и теплофизических свойствах свинцового баббита Б (PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием. При внешних воздействиях физико-химические свойства материалов определяются закономерностями их поведения в различных условиях. В связи широким применением свинцовых баббитов в различных отраслях промышленности ведутся систематические научно-исследовательские работы по улучшению их эксплуатационных характеристик. В связи с отсутствием в литературе сведений о влиянии щелочных металлов на свойство свинцовых баббитов нами они были

выбраны в качестве объекта исследования. Подобные сведения пополняют страницы соответствующих справочников и являются ценной информацией при выборе материала конструкций из баббитов.

Целью работы является исследование температурных зависимостей теплоёмкости и изменений термодинамических функций, кинетики и механизма процесса окисления, электрохимического поведения свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с щелочными металлами (Li, Na, K), и разработка новых коррозионностойких сплавов на их основе для различных отраслей машиностроения.

Задачи исследования:

- изучение температурной зависимости теплоёмкости и изменений термодинамических функций (энтальпия, энтропия, энергия Гиббса) свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием;
- изучение влияния добавок лития, натрия и калия на изменение структура и механических свойств свинцового баббита Б(PbSb15Sn10);
- исследование кинетики окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием, в твёрдом состоянии и определении механизма их окисления;
- изучение фазового состава продуктов окислений сплавов методом рентгенофазового анализа;
- изучение концентрационной зависимости изменений анодных характеристик свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием и выявление влияния концентрации хлорид-иона на коррозионную стойкость сплавов, в среде водного раствора NaCl.

Научная новизна исследований:

- установлены основные закономерности изменения теплоёмкости и термодинамических функций (энтальпия, энтропия и энергия Гиббса) свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) в зависимости от количества легирующего элемента. Показано, что с ростом температуры теплоёмкость, энтальпия, энтропия свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием увеличиваются, а значение энергии Гиббса уменьшается. С повышением концентрации лития, натрия и калия теплоёмкость, энтальпия и энтропия увеличиваются, а значение энергии Гиббса свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) уменьшается;
- методом металлографии показано, что добавки лития, натрия и калия, особенно от 0,5 до 1,0 мас. % значительно измельчают структурные составляющие свинцового баббита Б(PbSb15Sn10);
- стандартными методами измерения (метод Бринелля) твёрдости металлов показано, что добавки до 1,0 мас.% щелочных металлов (Li, Na, K) уменьшают твёрдость и прочности свинцового баббита Б(PbSb15Sn10);
- методом термогравиметрии показано, что с ростом температуры и содержания лития, натрия и калия в баббите Б(PbSb15Sn10) скорость его окисления незначительно увеличивается. Установлены закономерности изменения кинетических и энергетических характеристик процесса окисления сплавов, в твёрдом состоянии, в воздушной среде;

- методом рентгенофазового анализа определено, что при окислении исследованных сплавов образуются простые оксиды и оксиды типа шпинелей PbO , Li_2SnO_3 , $Pb_2Sb_2O_7$; Sb_2O_3 ; Pb_3O_4 ; Sb_2O_4 , $(Pb_3Sb_2O_{8,47})_{6,4}$; Pb_3O_4 ; $Pb_{0,828}O_2$; Sb_2O_4 ; Na_3SbO_3 ; $NaSbO_3$; $PbSb_2O_6$, $Pb_{0,986}O_2$, $Pb_2(SnSb)O_{6,5}$, Sb_2O_5 , $PbSb_2O_6$, Pb_2SnO_4 , $K_4(PbO_3)$, $K_3Sb_5O_{14}$. Установлена роль легирующих элементов в формировании фазового состава продуктов окисления сплавов и механизме процесса их окисления;

- потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме (скорость развёртки потенциала 2мВ/с) показано, что добавки (0.01-1,0 мас.%) лития, натрия и калия на 10-15% повышают коррозионную стойкость свинцового баббита Б(PbSb15Sn10). Установлены закономерности изменения основных коррозионно-электрохимических характеристик (потенциалов коррозии, питтингообразования и репассивации) сплавов от концентрации легирующих компонентов и хлорид-иона.

Практическая значимость работы. На основе выполненных экспериментальных исследований установлены оптимальные концентрации лития, натрия и калия в свинцовом баббите Б(PbSb15Sn10), повышающих его коррозионную стойкость. Сплавы могут использоваться для механизмов и машин строительно-дорожного и сельскохозяйственного оборудования, работа которых связана с высокой влажностью и даже в воде. Выполненные научные исследования послужили основой для разработки состава новых материалов для изготовления антифрикционного слоя в многослойных подшипниках скольжения для двигателей внутреннего сгорания, шатунных подшипников, вкладышей, упорных подшипников и другое, которые защищены малым патентом Республики Таджикистан ТЖ №1327.

Методы исследования и использованная аппаратура:

- метод исследования теплоёмкости сплавов в режиме «охлаждения» с использованием автоматической регистрации температуры образца от времени охлаждения;

- метод металлографии для проведения микроструктурного анализа сплавов (микроскоп марки БИОМЕД-1);

- метод Бринелля для определения твёрдости металлов (ТШ-2);

- метод термогравиметрии для изучения кинетики процессов окисления металлов и сплавов;

- рентгенофазовый анализ продуктов окислений сплавов (ДРОН-3);

- потенциостатический метод для изучения анодных свойств баббита (прибор ПИ 50-1.1);

Основные положения, выносимые на защиту:

- результаты исследования температурных зависимостей теплоёмкости и изменений термодинамических функции свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием;

- результаты микроструктурного анализа и механических свойств свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием;

- закономерности изменения энергетических и кинетических параметров процесса окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием;

- результаты исследований продуктов окисления сплавов, установление роли продуктов окисления сплавов в процессе окисления и определении механизма окисления сплавов в твёрдом состоянии;
- зависимости анодных характеристик и скорости коррозии свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием в среде электролита NaCl;
- установленные оптимальные концентрации лития, натрия и калия как легирующего компонента, улучшающие коррозионную стойкость свинцового баббита Б(PbSb15Sn10).

Личный вклад автора заключается в анализе литературных данных, в постановке и решении задач исследований, подготовки и проведении экспериментальных исследований в лабораторных условиях, анализе полученных результатов, в формулировке основных положений и выводов диссертации.

Степень достоверности и апробация исследования обеспечена современными методами исследования, качественным соответствием полученных результатов с известными имеющимся в литературе экспериментальными данными и теоретическими представлениями. Опыты проводились на приборы прошедших аттестацию.

Результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих научных конференциях, симпозиумах и форумах:

Международные: VIII Межд. конференции «Современные проблемы физики», ГНУ «Физико-технический институт им. С.У. Умарова НАН Таджикистана» (Душанбе, 2022); Межд. научной конференции «Инновационное развитие науки», Центр по исследованию инновационных технологий НАН Таджикистана (Душанбе, 2022); Межд. научно-практической конференции «Современные проблемы металлургической промышленности» (Душанбе, 2021); Межд. научно – практической конференции «Энергетика: состояние и перспективы развития» (Душанбе, 2021); Межд. научно-практической конференции «Современные проблемы металлургической промышленности» (Душанбе, 2021).

Республиканские: Респ. научно-теоретической конференции «Проблемы современной химии и состояния ее внедрения в учебный процесс» (Дангара, 2022); Респ. научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития естественных и точных наук», Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе (Душанбе, 2022); XVII Нумановские чтения «Результаты инновационных исследований в области химических и технических наук в XXI веке», ГНУ «Институт химии имени В.И. Никитина НАН Таджикистана» (Душанбе, 2022);

Публикации. Результаты работы отражены в 20 научных публикациях, из которых 9 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Российской Федерация: «Металлы», «Металлург», «Журнал физической химии», «Вестник Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», «Вестник Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева», «Вестник Саратовский государственный технический университет», «Вестник Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,

«Журнал Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением» и 10-статьи в материалах международных и республиканских конференций, а также получен малый патент Республики Таджикистан.

Объем и структура исследования. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав и приложения, изложена на 188 страницах компьютерного набора, включает 62 рисунков, 50 таблиц, 155 библиографических наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены защищаемые положения.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы по теме исследования. Описаны область применения и свойства свинцовых сплавов и их теплофизические свойства; особенности окисления и коррозионно-электрохимического поведения свинцового сплавов в различных средах. На основе выполненного обзора отмечено, что теплофизические свойства отдельных групп сплавов хорошо изучены. Имеются сведения о влиянии температуры и легирующих металлов на их тепловые и теплофизические свойства. Однако в литературе отсутствует информация о термодинамических, кинетических и анодных характеристиках свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием.

ГЛАВА II. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ, И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВИНЦОВОГО БАББИТА Б(PbSb15Sn10) С ЛИТИЕМ, НАТРИЕМ И КАЛИЕМ

Изучение микроструктуры является одним из главных средств исследования сплавов. Это дает возможность определять влияние различных деформационных и термических обработок на свойства готовых баббитовых изделий, а также анализировать причины ее брака. Микроструктуру баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием исследовали на световом микроскопе марки БИОМЕД-1.

Для исследования микроструктуры исследуемых образцов из полученного расплава отливались цилиндрические образцы диаметром 10-16 мм и длиной 5-10 мм. Каждый образец предварительно отшлифовывали, обезжиривали спиртом и погружали в 20%-ный водный раствор азотной кислоты. Время травления составляло от 10 до 20 с. После травления микрошлиф промывали в проточной воде и тщательно высушивали прижатием к чистой фильтровальной бумаге.

Микроструктуры свинцового баббита с литием, натрием и калием приведены на рис. 1. Видно кристаллы SbSn на фоне тройной эвтектики Pb+SbSn+ γ , а также небольшое количество иглообразных кристаллов химических соединения SnSb, PbLi, PbNa, PbK. Баббит на основе свинца лежит на линии Pb-SnSb, поэтому его кристаллизация закончится образованием двойной эвтектики $\alpha(\text{Pb}) + \beta(\text{SnSb})$. Добавки лития, натрия и калия особенно от 0,5 до 1,0 мас. % значительно измельчают структурные составляющие исходного сплава.

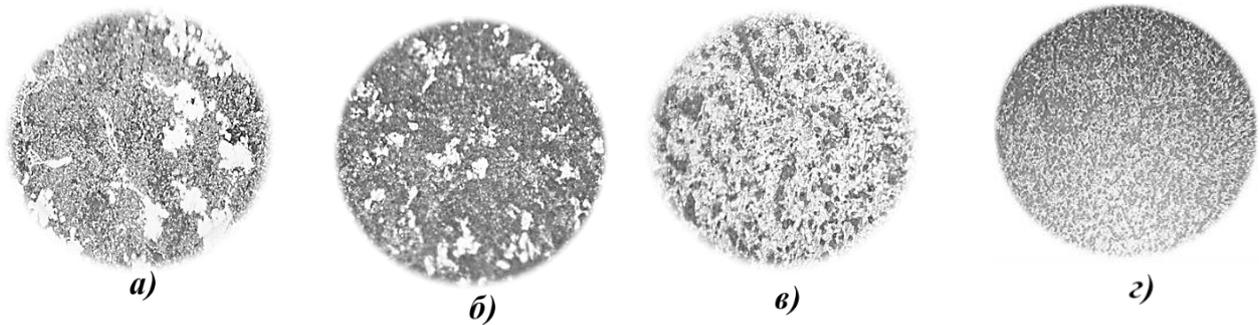


Рисунок 1. Микроструктура (x500) свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с 1,0 мас.% литием (б), натрием (в) и калием (з).

Одной из наиболее распространенных характеристик, определяющих качество металлов и сплавов, возможность их применения в различных конструкциях и при различных условиях работы, является твердость. Испытания на твердость производятся чаще, чем определение других механических характеристик металлов: прочности, относительного удлинения и др. Твердость сплавов измерили по Бринеллю согласно стандартной методике на приборе ТШ-2. Испытанию подвергались образцы толщиной 10мм, диаметром 16мм.

Существует приближенная зависимость предела прочности металла и твердости по Бринеллю

$$\sigma_B = k \cdot HB, \text{ МПа.} \quad (1)$$

Значение k для свинцовых сплавов равно 0,07. С учётом этого пересчитано значение σ_B сплавов. Результаты расчетов представлены в таблице 1. Как видно при добавке лития, натрия и калия до 1,0 мас. % твердость и прочность исходного сплава уменьшается.

Таблица 1. Твёрдость и прочность свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием.

Содержание лития, натрия и калия в баббите, мас.%	*Твёрдость HB, кгс/мм ²	*Твёрдость HB, МПа	Расчетная прочность, МПа
0,0	22,86	224,18	15,70
0,01Li	21,87	214,47	15,01
0,1Li	19,43	190,54	13,33
0,5Li	17,72	173,77	12,14
1,0Li	16,29	159,75	11,18
0,01Na	22,36	219,27	15,34
0,1Na	20,94	205,35	14,37
0,5Na	18,46	181,03	12,67
1,0Na	17,54	172,01	12,04
0,01K	22,12	216,92	15,18
0,1K	20,27	198,72	13,91
0,5K	18,00	176,51	12,35
1,0K	16,86	165,34	11,57

*среднее значение определили по результатам 3 измерений.

Одним из методов, позволяющих корректно установить $C_p^0 = f(T)$ для металлов и сплавов, в области высоких температур является метод сравнения скоростей охлаждения двух образцов, исследуемого и эталонного, по закону охлаждения Ньютона – Рихмана.

Образцы изготавливаются в виде цилиндра длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставляются термопары. Каждый из них нагревают до достаточно высокой температуры, а затем дают возможность остывать, записывая температуру через определённые отрезки времени, т.е. снимая кривую охлаждения. Условия, в которых происходит остывание образцов, должны быть одинаковыми.

Для двух образцов одинакового размера при допущении площади их поверхности $S_1 = S_2$ и коэффициенты теплоотдачи $\alpha_1 = \alpha_2$, теплоемкость определяется по формуле

$$C_{p_2}^0 = C_{p_1}^0 \cdot \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1}{\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2}, \quad (2)$$

где $m_1 = \rho_1 V_1$ – масса первого образца;

$m_2 = \rho_2 V_2$ – масса второго образца;

$\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_1, \left(\frac{dT}{d\tau}\right)_2$ – скорости охлаждения образцов из эталона и исследуемых сплавов при данной температуре.

Для определения скорости охлаждения строят кривые охлаждения исследуемых образцов. Кривая охлаждения представляет собой зависимость температуры образца от времени при охлаждении его в неподвижном воздухе. Экспериментально полученные кривые охлаждения образцов из свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием представлены на рис. 3а. Шаг измерения температуры составил 0,1 К. Временной интервал фиксации температуры составлял 10 с. Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 313 К до 673 К составляла $\pm 1\%$, а при более 673 К $\pm 2,5\%$. Погрешность измерения теплоемкости по предлагаемой методике не превышает 4%. В нашем случае погрешность не превышал 1%. Вся обработка результатов производилась по программе MS Excel и графики строились с помощью программы Sigma Plot 10.0. Коэффициент корреляции составил не менее 0,999.

Полученные кривые охлаждения образцов из полученных сплавов (рис. 3а) описываются уравнением вида:

$$T = ae^{-b\tau} + pe^{-k\tau}, \quad (3)$$

где a, b, p, k – постоянные для данного образца, τ – время охлаждения.

Дифференцируя уравнение (3) по τ , получаем уравнение для определения скорости охлаждения образцов из сплавов

$$\frac{dT}{d\tau} = -abe^{-b\tau} - pke^{-k\tau}. \quad (4)$$

Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнении (4) для исследованных образцов приведены в таблице 2. Кривые зависимости скорости охлаждения от температуры для образцов из свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием представлены на рис. 3б.

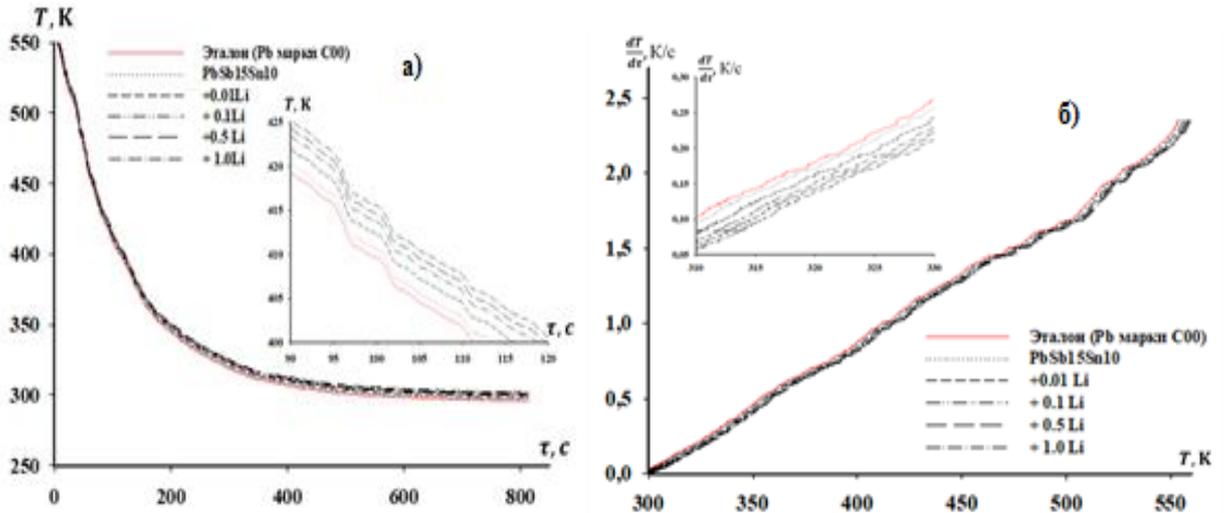


Рисунок 3. Термограммы (а) и скорости охлаждения от температуры (б) образцов из свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием и эталона (Pb марки С00)

Таблица 2. Значения коэффициентов a , b , p , k , ab , pk в уравнении (4) для свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием и эталона (Pb марки С00)

Содержание лития в баббите, мас. %	a , К	$b \cdot 10^{-2}$, c^{-1}	p , К	$k \cdot 10^{-4}$, c^{-1}	$a \cdot b$, Kc^{-1}	$pk \cdot 10^{-3}$, Kc^{-1}
0,0	264,4375	0,887	303,1807	0,283	2,34	8,59
0,01	264,4435	0,887	304,8877	0,282	2,35	8,60
0,1	264,4437	0,887	306,2875	0,281	2,35	8,60
0,5	264,4400	0,887	307,1825	0,280	2,35	8,60
1,0	264,4382	0,887	308,0800	0,279	2,34	8,59
Эталон	264,4373	0,886	302,1809	0,284	2,34	8,59

Далее по рассчитанным значениям величин скоростей охлаждения образцов из сплавов и теплоёмкости эталона по уравнению (2) была вычислена удельная теплоёмкость свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием. В таблице 4 и на рисунке 4а обобщены результаты расчётов величины теплоёмкости для рассматриваемых сплавов. Расчёты проводились согласно выражению (1), значения теплоёмкости фиксировались через каждые 50К. Показано, что величина теплоёмкости свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) увеличивается при введении в лития в качестве легирующего компонента баббита в количествах от 0.01 до 1.0 мас. %, что наглядно видно из зависимостей величин теплоёмкости баббитов от концентрации легирующего компонента (рис. 3а). Затем проведя полиномиальную регрессию получили следующую общую уравнению для описания температурной зависимости теплоемкости сплавов:

$$C_p^0 = a + bT + cT^2 + dT^3. \quad (5)$$

Значения коэффициентов уравнения (4) температурной зависимости теплоёмкости для свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, представлены в таблице 3.

Таблица 3. Значения коэффициентов a , b , c , d в уравнении (5) для свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием и эталона (Pb марки С00)

Содержание лития в баббите, мас. %	a , Дж/(кг·К)	b , Дж/(кг·К ²)	$c \cdot 10^{-3}$, Дж/(кг·К ³)	$d \cdot 10^{-5}$, Дж/(кг·К ⁴)	Коэффициент корреляции R
0,0	150,5740	-0,0852	0,365	-0,0297	0,999
0,01	151,0247	-0,0866	0,700	-0,0302	0,999
0,1	154,9641	-0,0995	0,417	-0,0346	0,999
0,5	172,5639	-0,1570	0,626	-0,0542	0,999
1,0	194,5256	-0,2285	0,887	-0,0786	0,999
Эталон	105,60	0,0940	-0,085	0,005	1,0

Таблица 4. Температурная зависимость удельной теплоёмкости (Дж/(кг·К)) свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием и эталона (Pb марки С00)

Содержание лития в баббите, мас. %	Т, К					
	300	350	400	450	500	550
0,0	149,84	152,73	155,89	159,08	162,09	164,71
0,01	150,19	153,09	156,26	159,46	162,47	165,07
0,1	153,30	156,39	159,74	163,10	166,21	168,82
0,5	167,13	171,02	175,19	179,25	182,77	185,36
1,0	184,41	189,33	194,57	199,52	203,60	206,22
Эталон	127,50	130,23	132,80	135,24	137,60	139,91

С использованием рассчитанных значений теплоёмкости и экспериментально полученных величин скоростей охлаждения образцов, нами был вычислен коэффициент теплоотдачи $\alpha(T)$ для свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием по формуле

$$\alpha = \frac{C_p^0 \cdot m \cdot \frac{dT}{dt}}{(T - T_0) \cdot S}, \quad (6)$$

где T и T_0 – температура образца и окружающей среды, S и m - площадь поверхности и масса образца, соответственно.

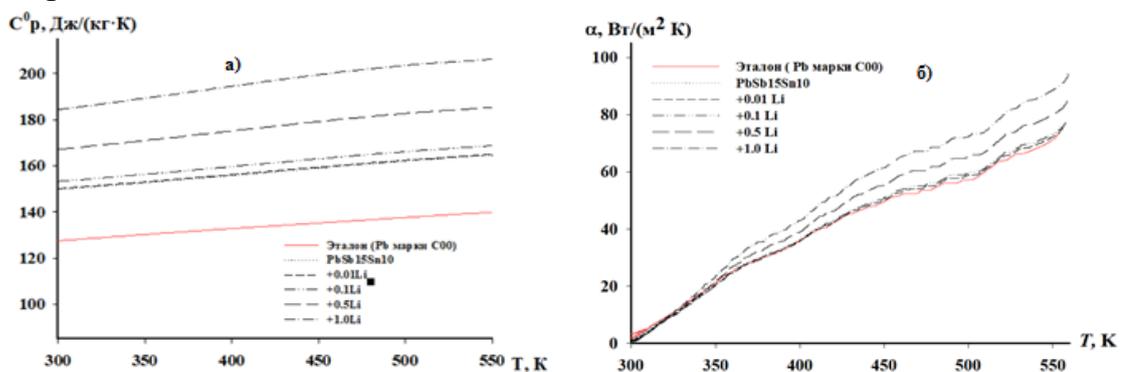


Рисунок 4. Температурная зависимость теплоёмкости (а) и коэффициента теплоотдачи (б) свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием и эталона (Pb марки С00)

На рисунке 4б приведены результаты расчёта коэффициента теплоотдачи свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, в зависимости от температуры. Добавки лития и температура увеличивают коэффициент теплоотдачи баббита Б(PbSb15Sn10).

Для расчёта температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по (7) - (9) для свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием были использованы интегралы от удельной теплоёмкости по уравнению (5):

$$[H^0(T) - H^0(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (7)$$

$$[S^0(T) - S^0(T_0)] = aln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{b}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (8)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \quad (9)$$

где $T_0 = 298,15$ К.

Результаты расчёта изменений термодинамических функций свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием представлены в таблице 5.

Таблица 5. Температурная зависимость изменений термодинамических функций свинцового баббита с литием и эталона (Pb марки С00)

Т, К	Эталон	Содержание лития в баббите, мас. %				
		0,0	0,01	0,1	0,5	1,0
$[H^0(T) - H^0(T_0)],$ кДж/кг для сплавов						
300	0,236	0,277	0,277	0,284	0,309	0,342
350	6,679	7,856	7,855	8,025	8,766	9,728
400	13,256	15,593	15,586	15,927	17,429	19,386
450	19,957	23,497	23,478	23,993	26,301	29,321
500	26,779	31,572	31,529	32,218	35,367	39,511
550	33,717	39,800	39,724	40,581	44,592	49,902
$[S^0(T) - S^0(T_0)],$ кДж/(кг·К) для баббитов						
300	0,0008	0,0009	0,0009	0,0009	0,0010	0,001
350	0,0206	0,0242	0,0243	0,0248	0,0271	0,0301
400	0,0382	0,0449	0,0449	0,0459	0,0502	0,0556
450	0,0539	0,0635	0,06351	0,0649	0,0711	0,0792
500	0,0684	0,0804	0,0805	0,0822	0,0902	0,1007
550	0,0816	0,0961	0,0962	0,0982	0,1078	0,1205
$[G^0(T) - G^0(T_0)],$ кДж/кг для баббитов						
300	-0,0007	-0,0008	0,0008	-0,0009	-0,0001	-0,0011
350	-0,5477	-0,6443	-0,6443	-0,6582	-0,7185	-0,7966
400	-2,0275	-2,3846	-2,3842	-2,4360	-2,6622	-2,9560
450	-4,3391	-5,1048	-5,1027	-5,2141	-5,7042	-6,3425
500	-7,4033	-8,7142	-8,7086	-8,8988	-9,7446	-10,849
550	-11,156	-13,1399	13,1279	-13,4144	-14,7013	-16,3869

Результаты исследования теплоёмкости и изменений термодинамических функций свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) показывают, что легирующий компонент в изученном концентрационном интервале (0.01 – 1.0 мас. %) увеличивает

теплоёмкость, энтальпию и энтропию исходного сплава. При этом значение энергии Гиббса сплавов уменьшается.

В таблице 6 обобщены результаты исследования теплоемкости и изменений термодинамических функций свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с щелочными металлами (литий, натрий, калий) на примере сплавов, содержащих 1,0 мас. % добавки. Видно, что с ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшается. При переходе от сплавов с литием к сплавам с натрием и калием теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов уменьшаются, значение энергии Гиббса имеет обратную зависимость.

Таблица 6. Температурная зависимость удельной теплоёмкости и термодинамической функции свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с 1 мас.% литием, натрием и калием

Т, К	Теплоемкость сплавов, Дж/(кг·К)			
	Содержание щелочных металлов в баббите, мас.%			
	0,0	1,0Li	1,0Na	1,0K
300	149,84	184,41	160,86	156,16
350	152,73	189,33	163,83	159,22
400	155,89	194,57	166,96	162,43
450	159,08	199,52	170,08	165,61
500	162,09	203,60	173,00	168,55
550	164,71	206,22	175,57	171,08
$[H^0(T) - H^0(T_0)]$, кДж/кг для сплавов				
300	0,277	0,342	0,297	0,289
350	7,856	9,728	8,413	8,172
400	15,593	19,386	16,683	16,213
450	23,497	29,321	25,109	24,414
500	31,572	39,511	33,688	32,769
550	39,800	49,902	42,404	41,263
$[S^0(T) - S^0(T_0)]$, кДж/(кг·К) для сплавов				
300	0,0009	0,0010	0,0010	0,0010
350	0,0242	0,0301	0,0260	0,0253
400	0,0449	0,0556	0,0481	0,0467
450	0,0635	0,0792	0,0679	0,0661
500	0,0804	0,1007	0,0860	0,0836
550	0,0961	0,1205	0,1026	0,0998
$[G^0(T) - G^0(T_0)]$, кДж/кг для сплавов				
300	-0,0008	-0,0011	-0,0010	-0,0010
350	-0,6443	-0,7966	-0,6902	-0,6703
400	-2,3846	-2,9560	-2,5533	-2,4804
450	-5,1048	-6,3425	-6,4623	-5,3078
500	-8,7142	-10,849	-9,3177	-9,0568
550	-13,1399	-16,3869	-14,0392	-13,6496

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ЛИТИЯ, НАТРИЯ И КАЛИЯ НА КИНЕТИКУ ОКИСЛЕНИЯ СВИНЦОВОГО БАББИТА Б(PbSb15Sn10), В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

В этой главе приведены результаты исследования влияния добавок литиям, натрию и калию на кинетику окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), в твердом состоянии. Для этого была синтезирована серия сплавов с содержанием от 0.01 до 1,0% по массе щелочных металлов (Li, Na, K). Исследование проводили в атмосфере воздуха при температурах 373 К, 423 К и 473 К.

Результаты исследования кинетики окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием представлены на рисунках 5-7 и в таблицах 7, 8. В таблице 7 обобщены рассчитанные значения кинетических и энергетических характеристик процесса окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием.

Таблица 7. Кинетические и энергетические параметры процесса окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием в твёрдом состоянии

Содержание лития в сплаве, мас. %	Температура окисления, К	Истинная скорость окисления $K \cdot 10^4$, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Кажущаяся энергия активации, кДж/моль
0,0	373	2.48	58.30
	423	2.53	
	473	2.60	
0,01	373	2.70	53.79
	423	2.74	
	473	2.79	
0,1	373	2.72	50.00
	423	2.78	
	473	2.86	
0,5	373	2.77	46.99
	423	2.85	
	473	2.90	
1,0	373	2.83	42.50
	423	2.89	
	473	2.95	

Кривые окисления сплавов характеризуются ростом привеса массы образцов в первые 15-20 минут от начала окисления. Затем наступает стабилизация процесса, что связано с формированием защитной оксидной плёнки на поверхности реагирования (рис. 5).

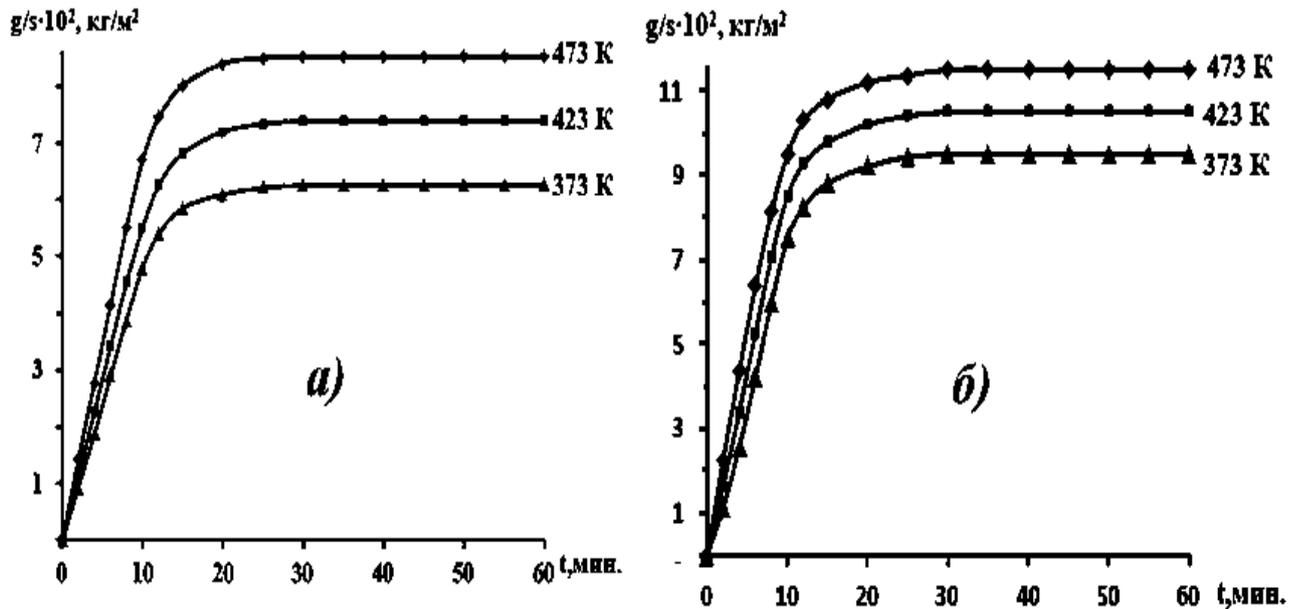


Рисунок 5. Кинетические кривые окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) (а), содержащего 1,0 мас. % литий (б).

Квадратичные кинетические кривые процесса окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием имеют не прямолинейный вид, что свидетельствует о не параболическом характере процесса окисления сплавов (рис. 6). В таблице 8 приведены полиномы квадратичных кинетических кривых окисления сплавов, которые описываются общим уравнением $y = k \cdot x^n$, где значения $n = 1 \div 4$.

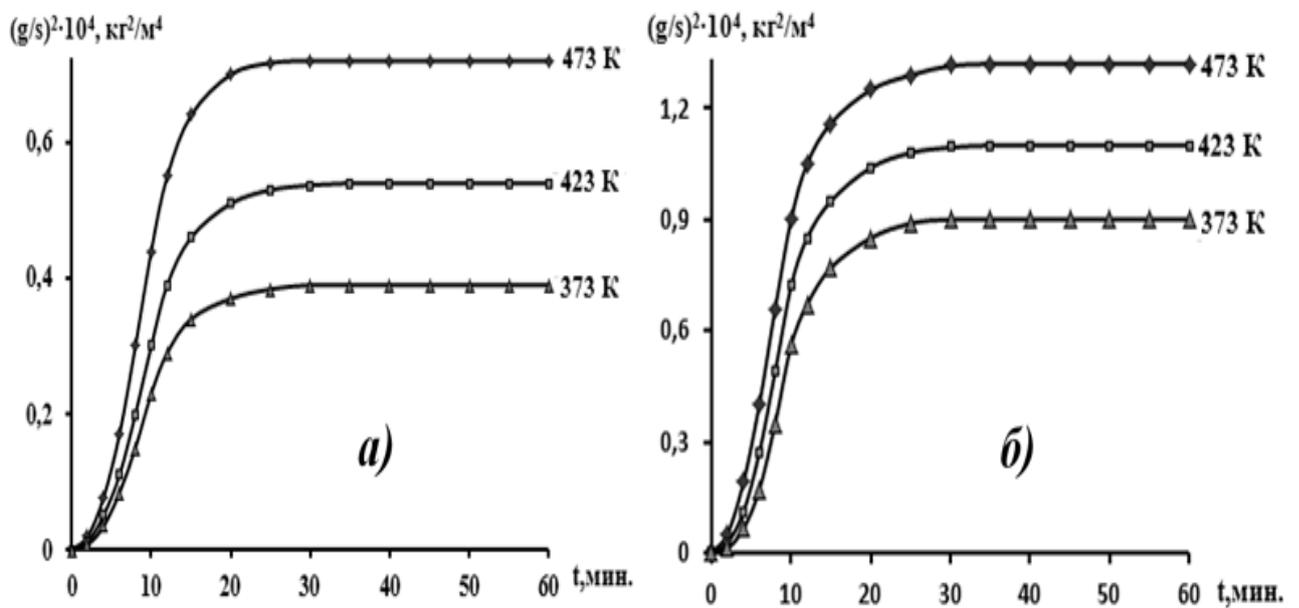


Рисунок 6. Квадратичные кинетические кривые окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) (а) содержащего 1,0 мас. % литий (б).

Таблица 7. Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, в твёрдом состоянии.

Содержание лития в сплаве, мас. %	Температура окисления, К	Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления сплавов	Коэффициент регрессии R
0,0	373	$y^* = -0,6 \cdot 10^{-2}x^4 + 0,4 \cdot 10^{-3}x^3 - 2,5 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,670x^{**}$	0,990
	423	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0,4 \cdot 10^{-3}x^3 - 2,9 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,777x$	0,992
	473	$y = -0,6 \cdot 10^{-4}x^4 + 0,6 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,7 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,955x$	0,993
0,01	373	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0,5 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,0 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,825x$	0,989
	423	$y = -0,6 \cdot 10^{-4}x^4 + 0,6 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,9 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,996x$	0,993
	473	$y = -0,6 \cdot 10^{-6}x^4 + 0,9 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,0 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,189x$	0,996
0,1	373	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0,5 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,4 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,8999x$	0,989
	423	$y = -0,6 \cdot 10^{-4}x^4 + 0,7 \cdot 10^{-3}x^3 - 4,3 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,072x$	0,993
	473	$y = -0,6 \cdot 10^{-6}x^4 + 0,1 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,4 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,267x$	0,996
0,5	373	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0,5 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,5 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,944x$	0,985
	423	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,8 \cdot 10^{-3}x^3 - 4,5 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,127x$	0,992
	473	$y = -0,6 \cdot 10^{-7}x^4 + 0,1 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,7 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,336x$	0,996
1,0	373	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0,6 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,7 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,003x$	0,998
	423	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,8 \cdot 10^{-3}x^3 - 4,9 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,206x$	0,991
	473	$y = -0,6 \cdot 10^{-7}x^4 + 1,1 \cdot 10^{-3}x^3 - 6,1 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,418x$	0,995

Примечание: y^* - привес массы образцов, ($\text{кг}/\text{м}^2$);

x^{**} - продолжительность времени окисления, (t , мин.).

Изохронные окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, представлены на рис. 7. Видно, что с увеличением концентрации лития в сплаве скорость окисления растёт, как при 10 минутной выдержке образцов в окислительной атмосфере (кривая 1), так и при 20-минутной выдержке (кривая 2). Эта закономерность более чётко выражается при 473К, о чем свидетельствует уменьшение величины кажущейся энергии активации окисления сплавов с ростом концентрации лития.

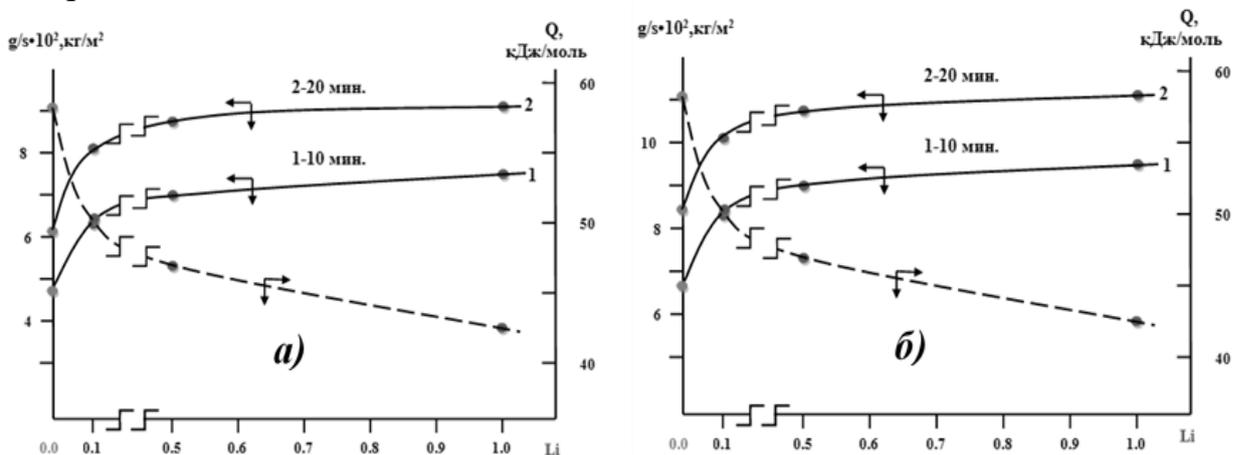


Рисунок 7. Изохроны окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием при 373 К (а) и 473 К (б).

На рис. 8 изображена зависимость $-\lg K=f(1/T)$ для свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), содержащего 0,01 – 1,0 мас. % лития, которые имеют прямолинейный характер. По тангенсу угла наклона данных прямых были определена величина кажущейся энергии активации процесса окисления сплавов.

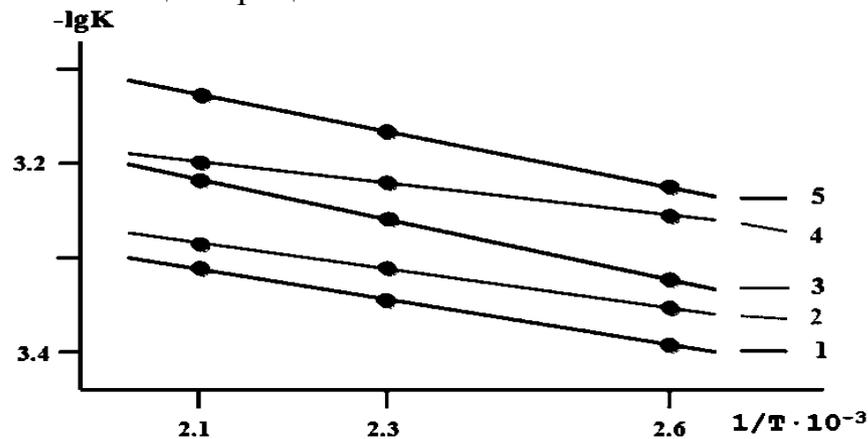


Рисунок 8. Зависимость $-\lg K=f(1/T)$ для свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) (1) с литием, мас. %: 0,01(2); 0,1(3); 0,5(4); 1,0(5)

Результаты рентгенофазового анализа продуктов окислений сплавов выполнена на дифрактометре общего назначения типа ДРОН-3 (Россия) оснащенного компьютером. Качественный фазовый состав определялся сопоставлением штрих-кодов, соответствующих им межплоскостным расстоянием d_{hkl} подобных характеристик известных веществ. Съемка проводилась в излучении $CoK\alpha$ ($\lambda=1,7902\text{\AA}$), при напряжении анода 30кВ, силе тока 30мА и интервале углов 2θ от 5 до 150°. По результатам рентгенофазового анализа продуктов окислений баббита Б(PbSb15Sn10) с литием установлено, что при окислениях сплавов образуются: PbO ; Li_2SnO_3 ; $Pb_2Sb_2O_7$; Sb_2O_3 ; Pb_3O_4 ; Sb_2O_4 (рис. 9).

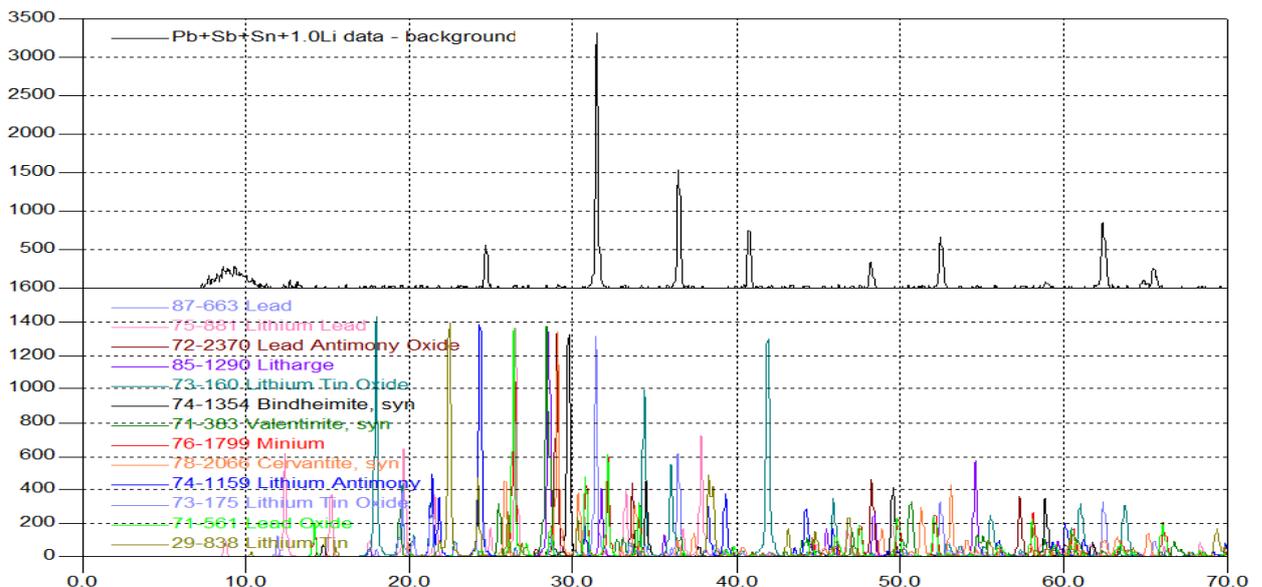


Рисунок 9. Дифрактограммы продуктов окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием

Обязующиеся при окислении свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием одинарные оксиды и оксиды типа шпинелей (Li_2SnO_3 , $\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$) не обладают достаточными защитными свойствами и поэтому отмечается рост скорости окисления от содержания легирующей добавки и с ростом температуры.

По результатам проведённых исследований можно выявить некоторые закономерности изменения величины кажущейся энергии активации процесса окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием. Из рисунка 10 видно, что при переходе от баббита с литием к баббиту с натрием и калием наблюдается уменьшение величины эффективной энергии активации процесса окисления.

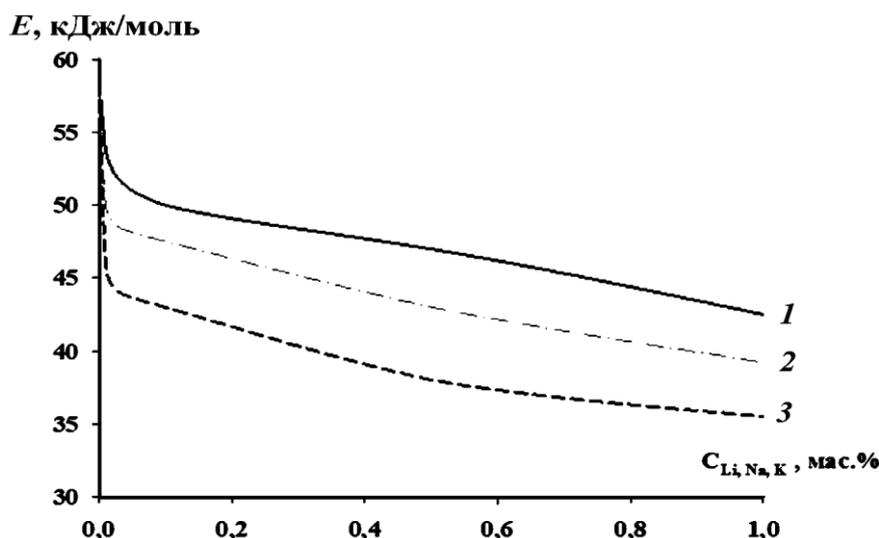


Рисунок 10. Сравнительное значение кажущейся энергии (кДж/моль) активации процесса окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием (1), натрием (2) и калием (3).

В целом, при экспериментальном исследовании кинетики окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием установлено, что самые максимальные значения скорости окисления относятся к баббиту с калием, а минимальные к баббитам с литием. Свинцовый баббит Б(PbSb15Sn10) с натрием занимает промежуточное положение. Показано, что легирующие компоненты значительно увеличивают окисляемость исходного свинцового баббита Б(PbSb15Sn10).

ГЛАВА 4. ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОСТОЙКОСТИ СВИНЦОВОГО БАББИТА Б(PbSb15Sn10), ЛЕГИРОВАНИЕМ ЛИТИЕМ, НАТРИЕМ И КАЛИЕМ

Исследования коррозионно-электрохимических свойств сплавов проводили на потенциостате ПИ-50-1-1 потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала 2 мВ/с, с помощью программатора ПР-8 и самозаписи ЛКД-4. Температура раствора поддерживалась постоянно 20°C, с помощью термостата МЛШ-8. Электродом сравнения служил хлорид серебряный, а вспомогательным – платиновый.

При коррозионно-электрохимическом исследовании образцы из свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) при погружении в электролит, были поляризованы в положительном направлении до плотности тока $1\text{A}/\text{m}^2$ (рис. 11, кривая I). Далее образцы поляризовались в противоположном направлении (рис. 11, кривые II и III до потенциала $(-1,200\text{ V})$, что привело к растворению оксидной пленки с поверхности образцов. Наконец, образцы снова поляризовали в положительном направлении, чтобы получить анодные поляризационные кривые сплавов (рис. 1, кривая IV). На рис. 11 показаны все четыре потенциодинамические кривые образцов, снятые в среде электролита 3,0%-ного NaCl. Пунктирными линиями обозначены обратные поляризационные кривые.

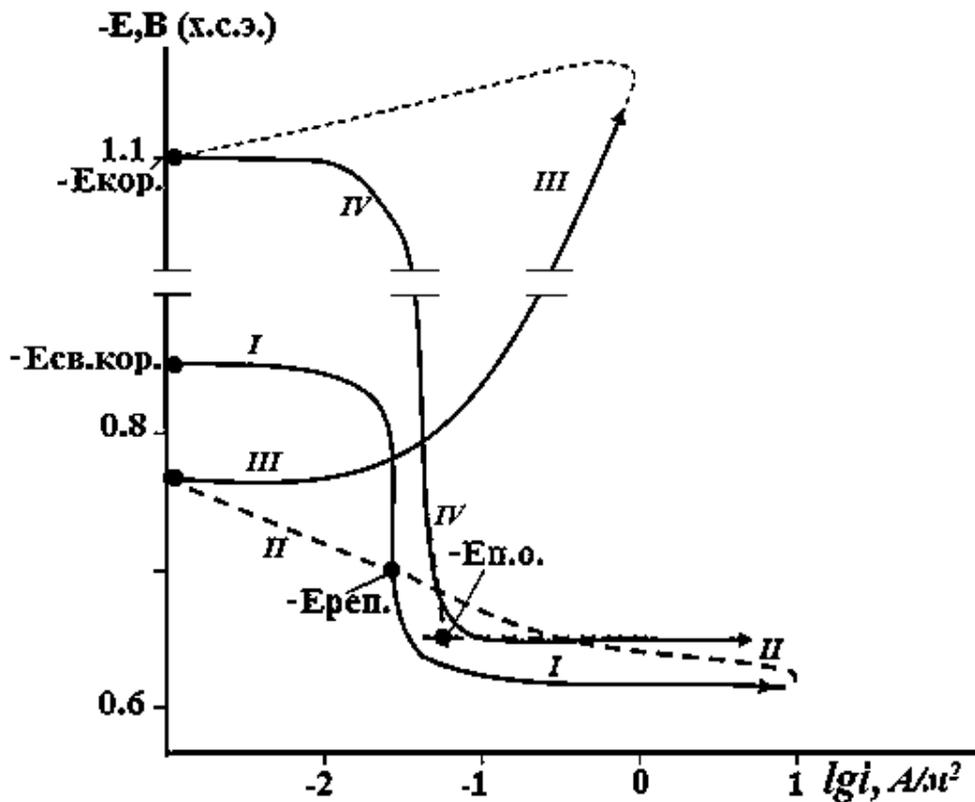


Рисунок 11. Полная поляризационная (2мВ/с) кривая свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), в среде электролита 3,0 %-ного NaCl

По ходу прохождения полной поляризационной кривой определяли следующие электрохимические параметры:

- $E_{ст.}$ или $-E_{св.кор.}$ – стационарный потенциал или потенциал свободной коррозии;
- $E_{рп.}$ – потенциал репассивации;
- $E_{кор.}$ – потенциал коррозии;
- $E_{п.о.}$ – потенциал питтингообразования;
- $i_{кор.}$ – ток коррозии.

Процесс коррозии свинцового баббита контролировался катодной реакцией ионизации кислорода в нейтральной среде, а ток коррозии рассчитывался с учетом тафелевской константы ($b_k = 0,12$ В) из катодной ветви потенциодинамических кривых.

Скорость коррозии k определяли по току коррозии ($i_{кор.}$) по формуле $K = i_{кор.} \cdot k$, где $k = 3,865$ г/Ач электрохимический эквивалент свинца.

Обобщённые результаты исследований коррозионно-электрохимических свойств свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с щелочными металлами (Li, Na, K) представлен в таблице 8. Видно, что добавки лития, натрия и калия от 0,01 до 1,0 мас.% к исходному сплаву в трех исследуемых средах NaCl сдвигают потенциалы свободной коррозии, репассивации и питтингообразования в положительную область значений и одновременно с этим повышают коррозионную стойкость свинцового баббита Б(PbSb15Sn10).

Таблица 8. Потенциалы (х.с.э.) свободной коррозии и питтингообразования свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием, в среде электролита NaCl

Среда NaCl	Содержание Li, Na и K в баббите	Баббит с Li		Баббит с Na		Баббит с K	
		-E _{св.кор.}	-E _{п.о.}	-E _{св.кор.}	-E _{п.о.}	-E _{св.кор.}	-E _{п.о.}
	мас. %	В (х.с.э.)					
0,03	0,0	0,612	0,510	0,612	0,510	0,612	0,510
	0,01Li	0,601	0,501	0,580	0,580	0,550	0,466
	0,1Li	0,589	0,492	0,570	0,472	0,541	0,455
	0,5Li	0,577	0,483	0,559	0,461	0,529	0,446
	1,0Li	0,566	0,472	0,548	0,450	0,520	0,435
0,3	0,0	0,720	0,595	0,720	0,595	0,721	0,596
	0,01Na	0,707	0,586	0,707	0,565	0,641	0,541
	0,1Na	0,695	0,577	0,695	0,554	0,629	0,531
	0,5Na	0,684	0,564	0,684	0,545	0,618	0,521
	1,0Na	0,672	0,555	0,672	0,536	0,609	0,510
3,0	0,0	0,850	0,653	0,850	0,651	0,851	0,651
	0,01K	0,840	0,642	0,840	0,620	0,781	0,595
	0,1K	0,828	0,633	0,828	0,610	0,768	0,584
	0,5K	0,815	0,622	0,815	0,601	0,755	0,575
	1,0K	0,804	0,611	0,804	0,591	0,741	0,563

Механизм действия щелочных металлов на рост коррозионной стойкости исходного баббита Б(PbSb15Sn10) заключается в сдвиге всех электрохимических потенциалов сплавов в область положительных значений и снижении плотности тока коррозии.

Из приведённого в таблице 9 значений скорости коррозии свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) следует, что добавки щелочных металлов в пределах 0.01÷1.0 мас. %

способствуют снижению скорости коррозии и плотности тока коррозии сплавов на 10-15%.

Таблица 9. Зависимость скорости коррозии свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием в среде электролита NaCl

Содержание лития, натрия и калия в баббите, мас. %	Среда NaCl, мас %					
	0,03		0,3		3,0	
	$i_{кор.} \cdot 10^2,$ А/м ²	$K \cdot 10^3,$ г/м ² ·ч	$i_{кор.} \cdot 10^2,$ А/м ²	$K \cdot 10^3,$ г/м ² ·ч	$i_{кор.} \cdot 10^2,$ А/м ²	$K \cdot 10^3,$ г/м ² ·ч
0,0	0,56	21,64	0,75	28,98	0,90	34,78
0,01Li	0,54	20,87	0,54	28,21	0,88	34,01
0,1Li	0,52	20,09	0,52	27,44	0,86	33,24
0,5Li	0,5	19,32	0,5	26,66	0,84	32,46
1,0Li	0,48	18,55	0,48	25,91	0,82	31,70
0,01Na	0,53	20,48	0,72	27,82	0,87	33,62
0,1Na	0,51	19,71	0,70	27,05	0,85	32,85
0,5Na	0,50	18,93	0,68	26,28	0,83	32,07
1,0Na	0,48	18,16	0,66	25,50	0,81	31,30
0,01K	0,51	19,71	0,70	27,05	0,85	32,85
0,1K	0,49	18,93	0,68	26,28	0,83	32,08
0,5K	0,47	18,16	0,66	25,50	0,81	31,30
1,0K	0,45	17,39	0,64	24,73	0,79	30,53

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа имеющихся в литературе сведений сделан вывод о необходимости синтеза нового свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием и проведения исследования коррозионно-электрохимических свойств высокотемпературного окисления, изучения температурных зависимостей теплоемкости и термодинамических функций данных сплавов и разработке состава новых сплавов для техники, работающей в особые условиях.

2. В режиме «охлаждения» исследована температурная зависимость теплоёмкости свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием. Установлено, что с ростом температуры теплоемкость сплавов растёт, а от содержания легирующего компонента уменьшается. При переходе от сплавов с литием, к сплавам с калием теплоёмкость сплавов уменьшается.

3. Исследования термодинамических функций свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием показали, что при переходе от сплавов с литием к сплавам с натрием энтальпия и энтропия сплавов уменьшаются, значение энергии Гиббса имеет обратную зависимость. С ростом температуры происходит повышение энтальпии, энтропии и снижение энергии Гиббса.

4. Исследовано влияние добавок лития, натрия и калия на твердость и прочность свинцового баббита Б(PbSb15Sn10). Показано, что значение твердости и прочности баббита при увеличении концентрации легирующего элемента уменьшается. Методом

металлографии показано, что добавки лития, натрия и калия до 1,0 мас.% значительно измельчают структурные составляющие исходного сплава Б(PbSb15Sn10).

5. Методом термогравиметрии исследована кинетика окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием. Установлено, что окисление сплавов подчиняется гиперболическому закону с истинной скоростью окисления порядка 10^{-4} кг·м⁻¹·сек⁻¹; выявлено, что максимальные значения кажущейся энергии активации имеет исходный свинцовый баббит Б(PbSb15Sn10), а минимальные – относятся к сплаву, легированного натрием.

6. Рентгенофазовым методом показано, что продукты окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием состоят из оксидов: PbO, Li₂SnO₃, Pb₂Sb₂O₇;

7. Потенциостатическим методом в потенциодинамическом режиме со скоростью развертки потенциала 2 мВ/с исследовано анодное поведение свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием, в среде раствора хлорида натрия. Установлено, что легирование литием, натрием и калием до 1.0 мас. % свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) повышает его анодную устойчивость в среде электролита NaCl на 10-15%. При этом наблюдается смещение в положительную область электрохимических потенциалов. С ростом концентрации хлорид-иона в электролите NaCl происходит рост скорости коррозии сплавов, что сопровождается смещением электрохимических потенциалов в область отрицательных значений.

8. На основе проведенных исследований разработаны составы новых сплавов на основе свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием, которые защищены малым патентом Республики Таджикистан (Патент №ТJ1327 от 22.12.2022г).

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

1. Установленные физико-химические параметры свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с литием, натрием и калием рекомендуются для пополнения страниц соответствующих справочников и могут использоваться при проектировании изделий из них.

2. Выполненные исследования по установлению анодных характеристик свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) позволяют рекомендовать его в качестве базового сплава при изготовлении антифрикционных материалов и получить при этом значительный экономический эффект за счет снижения материалоемкости единицы продукции, увеличения срок службы и надежности.

3. Опытные партии новых сплавов могут производиться на базе Государственного учреждения «Центр по исследованию инновационных технологий Национальной академии наук Таджикистана» с целью поставки заинтересованным предприятиям и ведомствам.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

Публикации в изданиях, входящих в базу цитирования Scopus и Web of Science:

1. Ganiev I.N. temperature dependence of the heat capacity and changes in the thermodynamic functions of BLi (PbSb15Sn10Li) lead babbitt doped with lithium / Ganiev I.N., **Khojanazarov Kh.M.**, Khojaev F.K., and Eshov B.B. // **Metallurgist**, Vol. 67, Nos. 1-2, May, 2023 (Russian Original Nos. 1-2, January–February, 2023) -P.240–248. (**Scopus - Q3**).

Ганиев И.Н. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций свинцового баббита БЛи (PbSb15Sn10Li), легированного литием / Ганиев И.Н., **Ходжаназаров Х.М.**, Ходжаев Ф.К., Эшов Б.Б. // **Металлург.** -2023. - № 2. - С.101-106. (**Scopus - Q3**).

2.Ganiev I.N. Heat Capacity and Thermodynamic Functions of Sodium-Alloyed Lead Babbitt BNa (PbSb15Sn10Na) / Ganiev I.N., **Khojanazarov Kh.M.**, Khojaev F.K., Eshov B.B. // **Russian Journal of Physical Chemistry A.** -2023. -Vol. 97, -No. 4, -P.550–555. (**Scopus - Q4**).

Ганиев И.Н. Теплоемкость и термодинамические функции свинцового баббита BNa (PbSb15Sn10Na), легированного натрием / Ганиев И.Н., **Ходжаназаров Х.М.**, Ходжаев Ф.К., Эшов Б.Б. // **Журнал физической химии.** -2023. -№4. -С. 469-475. (**Scopus -Q4**).

3. Ganiev I.N. The effect of sodium additives on the kinetics of oxidation of lead babbitt PbSb15Sn10Na in the solid state / Ganiev I.N., **Khojanazarov Kh.M.**, Khojaev F.K. // **Journal of Physical Chemistry.** -2023. -Vol. 97. -No. 2. -P. 334-339. (**Scopus -Q4**).

Ганиев И.Н. Влияние добавок натрия на кинетику окисления свинцового баббита PbSb15Sn10Na в твердом состоянии / Ганиев И.Н., Ходжаназаров Х.М., Ходжаев Ф.К. // **Журнал физической химии.** -2023. -№2. -С. 216-222. (**Scopus -Q4**).

4. Ганиев И.Н. Кинетика окисления свинцового баббита БЛи (PbSb15Sn10Li), модифицированного литием, в твердом состоянии / Ганиев И.Н., **Ходжаназаров Х.М.**, Одиназода Х.О., Ходжаев Ф.К. // **Металлы.** – 2023. - №2. С.93-99. (**Scopus-Q3**).

5. Ганиев И.Н. Теплоемкость и термодинамические свойства свинцового баббита BK (PbSb15Sn10K), модифицированием калием в области 300–550K / Ганиев И.Н., **Ходжаназаров Х.М.**, Ганиев И.Н., Ходжаев Ф.К., Одиназода Х.О. // **Журнал Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением.** – 2023. - №5. С. (**Web of Science**).

Публикации в изданиях входящих в перечень ВАК РФ:

6. Ганиев И.Н. Влияние добавок лития на коррозионно-электрохимическое поведение свинцового баббита БЛи (PbSb15Sn10Li) в среде электролита NaCl / Ганиев И.Н., **Ходжаназаров Х.М.**, Ходжаев Ф.К., Якубов У.Ш. // **Вестник Казанский государственный технический университет. им. А.Н. Туполева.** -2022. -№1.- С. 7-12.

7. **Ходжаназаров Х.М.** Потенциодинамическое исследование свинцового баббита BK (PbSb15Sn10K) с калием в среде электролита 3%-го NaCl / **Ходжаназаров Х.М.**, Ганиев И.Н., Ходжаев Ф.К. // **Вестник Саратовский государственный технический университет.** –2022. -№1 (92). -С. 86-92.

8. Ганиев И.Н. Влияние добавок калия на анодную устойчивость свинцового баббита БК (PbSb15Sn10K) / Ганиев И.Н., **Ходжаназаров Х.М.**, Одиназода Х.О., Ходжаев Ф.К. // **Вестник Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Химическая технология и биотехнология.** - 2022. -№1. -С. 52-63.

9. Ганиев И.Н. Потенциодинамическое исследование свинцового баббита БТ (PbSb15Sn10), с натрием, в среде электролита NaCl / Ганиев И.Н., **Ходжаназаров Х.М.**, Ходжаев Ф.К. // **Ползуновский вестник. ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».** -2022. -№1. -С. 126-133.

Изобретения по теме диссертации

10. Малый патент Республики Таджикистан № **TJ 1327**. Свинцовый баббит / Ганиев И.Н., Шокиров Ф.Ш., **Ходжаназаров Х.М.**, Ходжаев Ф.К., Зарифова М.С., Холмуродов Ф., Шарифов С.К., Ботуров К., Сафаров А.Г. // №2201673; заявл.03.05.2022г., опубл. 22.12.2022г.

Статьи, опубликованные в материалах международных и республиканских конференций:

11. **Ходжаназаров Х.М.**, Ганиев И.Н., Ходжаев Ф.К. / Особенности окисления свинцового баббита БНа (PbSb15Sn10) с натрием // Мат. межд. конф. «XIII Ломоносовские чтения», посвященной 115-летию академика Бободжона Гафурова» (28-29 апреля 2023 года). Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе – 2023. - С.223-227.

12. Ганиев И.Н., **Ходжаназаров Х.М.**, Ходжаев Ф.К., Эшов Б.Б., Одиназода Х.О. / Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи свинцового баббита БЛи (PbSb15Sn10Li) с литием // Мат. VIII Межд. конф. «Современные проблемы физики». ГНУ «Физико-технический институт им. С.У. Умарова НАН Таджикистана». г. Душанбе. 2022. - С.173-176.

13. **Ходжаназаров Х.М.**, Ганиев И.Н., Ходжаев Ф.К., Одиназода Х.О., Эшов Б.Б. / Исследование теплоёмкость свинцового баббита БК (PbSb15Sn10K) с калием // Мат. VIII Межд. конф. «Современные проблемы физики». ГНУ «Физико-технический институт им. С.У. Умарова НАН Таджикистана». – 2022г. -С.127-130.

14. Ганиев И.Н., **Ходжаназаров Х.М.**, Ходжаев Ф.К., Эшов Б.Б. / Влияние добавок калия на коррозионно-электрохимическое поведение свинцового баббита БК(PbSb15Sn10K), в среде электролита 0.3%-ного NaCl // Мат. Межд. научной конф. «Инновационное развитие науки». ГУ «Центр по исследованию инновационных технологий Национальной Академии наук Таджикистана». г. Душанбе. 2022. -С. 13-16.

15. **Ходжаназаров Х.М.**, Ганиев И.Н., Ходжаев Ф.К. / Анодное поведение свинцового баббита PbSb15Sn10 с натрием, в среде электролита 3%-ного NaCl // Мат. Межд. научно-прак. конф. «Современные проблемы металлургической промышленности». Душанбе. -2021. -С. 59-63.

16. **Ходжаназаров Х.М.**, Ганиев И.Н., Ходжаев Ф.К. / Влияние добавок лития на коррозионно-электрохимические свойства свинцового баббита PbSb15Sn10 в среде электролита 0,03%-ного NaCl // Мат. Межд. научно-практ. конф. «Современные проблемы металлургической промышленности». ТТУ им. М.С. Осими. Душанбе. - 2021. -С. 138-142.

17. Ганиев И.Н., **Ходжаназаров Х.М.**, Ходжаев Ф.К., Иброхимов Н.Ф. / Температурная зависимость теплоёмкости и термодинамических функций свинцового баббита PbSb15Sn10 // Мат. Межд. научно – практ. конф. «Энергетика: состояние и перспективы развития». г. Душанбе. - 2021. // С. 209-213.

18. **Ходжаназаров Х.М.**, Ганиев И.Н., Ходжаев Ф.К., Одиназода Х.О. / Коррозионно-электрохимические свойства свинцового баббита БК (PbSb15Sn10K) модифицированного калием, в среде водного раствора 0,03%-ного NaCl // Мат. Респ. научно-теор. конф. «Проблемы современной химии и состояния ее внедрения в учебный процесс». Дангара – 2022. - С.58-64.

19. **Ходжаназаров Х.М.**, Ганиев И.Н., Ходжаев Ф.К., Одиназода Х.О. / Коррозионно-электрохимическое исследование свинцового баббита БЛи (PbSb15Sn10Li) с литием в среде электролита 0.3%-ного NaCl // Мат. Респ. научно-практ. конф. «Актуальные проблемы и перспективы развития естественных и точных наук». Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе – 2022. -С.108-113.

20. **Ходжаназаров Х.М.**, Ганиев И.Н., Ходжаев Ф.К., Одинаев А.Х. / Микроструктура свинцового баббит БНа (PbSb15Sn10Na) с натрием и фазовый состав продуктов их окислений // Сборник материалов XVII Нумановские чтения. «Результаты инновационных исследований в области химических и технических наук в XXI» ГНУ «Институт химии имени В.И. Никитина НАН Таджикистана». г. Душанбе. 2022. –С. 112-115.

Сдано в печать __ . __ . 2023 г.
Подписано в печать __ . __ . 2023 г.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии ТТУ им. М.С. Осими
г. Душанбе, ул. академик Раджабовых-10