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

На правах рукописи

Джумъаева Мавджуда Бердиевна

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВИНЦОВОГО БАББИТА Б(PbSb15Sn10) С МАГНИЕМ, ЦИНКОМ И КАДМИЕМ

Научная специальность
2.6.17-Материаловедение (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Душанбе – 2025

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:	**Назаров Холмурод Марипович -** доктор технических наук, профессор, заместитель директора Филиала Агенства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана в Согдийской области
	Олимов Насруддин Солехович - кандидат химических наук, доцент кафедры «Общетехнические дисциплины и машиноведение», Таджикский государственный педагогический университет имени Садриддина Айни
Ведущая организация:	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, кафедра «Материаловедение, металургические машины и оборудования»

Защита состоится «19» января 2026 года в 9^{00} 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: «____»_____ 2025 года

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат химических наук **Халикова Л.Р.**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В наше время свинцовые сплавы нашли заслуженное место в машиностроении благодаря своим положительным характеристикам. Они служат основой для создания надёжных подшипников, которые выдерживают большие нагрузки и работают в экстремальных условиях. Такие подшипники обеспечивают устойчивую работу турбин, авиационных двигателей, дизелей и других быстроходных машин, где требования к износостойкости и надёжности запчастей особенно высоки. Эти сплавы, получившие общее название баббиты, являются наиболее распространёнными антифрикционными сплавами. Баббит - легкоплавкий антифрикционный сплав на основе олова или свинца, применяемый для заливки вкладышей подшипников скольжения. Условия работы антифрикционных сплавов определяют предъявляемые к ним требования. Баббит должен иметь низкий коэффициент трения, высокую твёрдость и износостойкость, а также достаточную пластичность для хорошей перерабатываемости к поверхности. Их используют в подшипниках скольжения в виде рабочих вкладышей или для заливки поверхности вращающихся частей машин. Низкая стоимость действительно является ключевым преимуществом свинцовых баббитов, что делает их крайне привлекательными для применения в решении технических задач.

Баббит марки БТ (PbSb15Sn10Te0.2) действительно выделяется своими уникальными свойствами которое широко используется фрикционных деталях. Его состав, включающий около 0,2% теллура вместо никеля, обеспечивает повышенную вязкость, что делает его идеальным для использования в подшипниках, подвергающихся ударным нагрузкам, таких, как двигатели автомобилей и тракторов. Независимо от высокого коэффициента трения, баббиты БТ широко применяются благодаря своей способности к приработке и удовлетворительной пластичности. Термическая обработка улучшает и увеличивает пластичность баббита БТ, твёрдость при этом снижается.

Свинцовые баббиты играют важную роль в создании антифрикционных слоёв для многослойных подшипников скольжения, применяемых в двигателях внутреннего сгорания, шатунных подшипниках, вкладышах и упорных подшипниках. Однако, их ограниченная коррозионная стойкость в агрессивных средах существенно сужает спектр их применения. В рамках нашей работы мы сосредоточились на улучшении состава свинцовых баббитов, содержащих сурьму и олово, чтобы повысить их устойчивость к коррозии, сохраняя при этом высокую усталостную прочность.

Цель работы состоит в разработке состава нового свинцового баббита, легированного магния, цинка и кадмия путём исследования физико-механических и химических свойств. Исследование направлено на создание новых коррозионно-устойчивых материалов, которые будут применяться в различных областях машиностроения.

Задачи исследования:

• исследование температурной зависимости теплоёмкости и изменений термодинамических функций свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с добавками магния, цинка и кадмия;

• исследование влияния добавок магния, цинка и кадмия на изменения микроструктуры и механических свойств свинцового баббита Б(PbSb15Sn10);

• изучение кинетики окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием, цинком и кадмием в твёрдом состоянии и определение механизм их окисления;

• исследовать рентгенофазовым анализом составы продуктов окисления сплавов.

• проведение анализа концентрационной зависимости изменений анодных характеристик свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с добавлением магния, цинка и кадмия, а также влияние концентрации хлорид-иона на коррозионную стойкость сплавов в электролите хлорида натрия.

Научная новизна заключается в том, что в работе впервые:

• эксперименты показывают, что легирующие элементы значительно влияют на теплоёмкость и термодинамические функции свинцового баббита Б(PbSb15Sn10). Выявлено, что с повышением температуры увеличиваются теплоёмкость, энтальпия и энтр+

опия свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием, цинком и кадмием в то же время энергия Гиббса уменьшается. При повышении концентрации легирующих элементов также наблюдается рост указанных параметров.

• металлографический методом показано, что добавление магния, цинка и кадмия (от 0,1 до 2,0 масс. %) способствуют значительному измельчению структурных составляющих свинцового баббита Б(PbSb15Sn10).

• исследования показывают, что добавки Mg, Zn, Cd (до 2,0 мас.%) действительно способствуют увеличению твёрдости и прочности свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) по методике Бринелля.

• методом термогравиметрии установлено, что с повышением температуры и содержания магния, цинка и кадмия в баббите Б(PbSb15Sn10) скорость его окисления увеличивается. Определены закономерности изменения кинетических и энергетических характеристик сплавов.

• методом рентгенофазового анализа (РФА) установлено, что при окислении исследованных компонентов образуются различные оксиды: PbO, Pb_2O, ZnO, $Pb_2Sb_2O_6$; Sb_2O_3; Pb_3O_4; Sb_2O_4, $(Pb_3Sb_2O_{8,47})_{6,4}$; Pb_3O_4; SnO_2; Sb_2O_4; MgO; $Mg(Sn_2O_5)$; $PbSb_2O_6$, $Cd(SeO_3)$, $Pb_2(SnSb)O_{6.5}$, Sb_2O_5, $PbSb_2O_6$, Pb_3O_4, $ZnSe_2O_5$, Pb_2SnO_4. Формирование фазового состава продуктов окисления и динамический процесс окисления определяются ролью легирующих элементов.

• Исследования, проведённые с использованием потенциостатического метода в потенциодинамическом режиме со скоростью развёртки потенциала 2 мВ/с, показали, что добавки Mg, Zn, Cd (0,1–2,0 масс.%) значительно улучшают коррозионную стойкость свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), в

частности, наблюдается увеличение устойчивости к коррозии на 25–40%. Эксперименты показывают, что концентрация легирующих компонентов и хлорид-ионов оказывает влияние на коррозионно-электрохимические характеристики сплавов. Добавки элементов могут смещать потенциалы коррозии, питтингообразования и репассивации в положительную область.

Практическая значимость работы. Исследования показывают, что добавки магния, цинка и кадмия в свинцовый баббит Б(PbSb15Sn10), оказывают значительное влияние на его коррозионную стойкость. Эти сплавы находят широкое применение в механизмах и машинах, применяемых в машиностроение, дорожной технике и сельском хозяйстве, эффективно функционируя даже в условиях повышенной влажности и агрессивной средах.

Разработка новых марок баббитов и исследование состава антифрикционного слоя стали важным этапом в создании многослойных подшипников скольжения, используемых в двигателях внутреннего сгорания, шатунных подшипниках, вкладышах и упорных подшипниках. Достижения в этой области были официально закреплены малым патентом Республики Таджикистан TJ №1545, подтверждающим инновационный подход к созданию высокоэффективных конструкционных материалов.

Методы исследования и использованная аппаратура:

• теплоёмкость сплавов исследовалось в режиме «охлаждение» с автоматической регистрацией температуры образца, что позволило отслеживать её изменения во времени;

• металлографический и микроструктурный анализы сплавов проводились с использованием микроскопа марки KP-L3230-2K, это позволило детально изучить структуру материалов и их характеристики;

• для определения твёрдости метода Бринелля металлов использовался прибор MODEL HBRV-187.5D;

• метод термогравиметрии использовался для исследования кинетики процессов окисления сплавов, что позволяет установить закономерности изменения свойств изучаемых веществ при нагревании.

• рентгенофазовый анализ продуктов окисления сплавов проводился с использованием аппарата типа ДРОН-3;

• потенциостатический метод изучения анодных свойств баббитов осуществлялся с помощью прибора ПИ 50-1.1.

Основные положения, выносимые на защиту:

• результаты анализа добавок Mg, Zn, Cd на теплоёмкость и изменений термодинамические характеристик свинцового баббита Б(PbSb15Sn10);

• результаты микроструктурного анализа и механических свойств свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с легирующими элементами (магния, цинка, кадмием).

• процесс окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием, цинком и кадмием и закономерности изменения энергетических и кинетических параметров процесса.

• результаты исследований продуктов окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием, цинком и кадмием и установление их роли в формировании механизма окисления в твёрдом состоянии.

• закономерности изменения анодных характеристик и скорости коррозии свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) в среде хлорида натрия с добавлением легирующих элементов.

• оптимальные концентрации магния, цинка, кадмием в качестве легирующих добавок, способствующих повышению коррозионной стойкости свинцового баббита Б(PbSb15Sn10).

Степень достоверности и апробация результатов: Международные: III международной научной конференции «Инновационной развитие науки». Центр по исследованию инновационных технологий НАН Таджикистана» (Душанбе, 2024); XIX Нумановские чтения «Развитие фундаментальной и прикладной химии и её вклад в индустриализацию страны ГНУ» «Институт химии имени В.И. Никитина», (Душанбе, 2024); IX Международной научной конференции «Современные проблемы физики», посвященной 60-летию образования ГНУ «Физико-технический институт им. С.У. Умарова Национальной Академии наук Таджикистана» (Душанбе, 2024); VI Международной научной конференции «Вопросы физической и координационной химий», посвященной «Двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования», 90-летию доктора химических наук, профессора Якубова Х. М., и памяти доктора химических наук, профессора Юсуфова З. Н., 75-летию и 53-летию научно-педагогической деятельности доктора химических наук, профессора Рахимовой М., Таджикский национальный университет» (Душанбе, 2024); Межд. научно-практ. конф. «Роль химии и химической промышленности в ускоренной индустриализации страны», посвященная провозглашению 2020-2040 годов «Двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования», ТТУ имени М.С. Осими (Душанбе, 2024);

Республиканские: Респ. научно–практ. конф. «Проблемы и тенденции развития точных, математических и естественных наук», посвященной двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук, Российско–Таджикский (Славянский) университет, (Душанбе, 2024); Респ. научно-практической конференции «Роль промышленности в развитии производства», посвященной «Годам развития промышленности» (2022-2026 гг.) и «Двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук в области науки образовании» (2020-2020 гг.) ТГПУ имени С.Айни, (Душанбе, 2024);

Личный вклад автора состоит в формулировке цепи и задач исследования; поиске и анализе научно-технической литературы; в проведении теоретических и экспериментальных исследований; анализе, обработке и обобщении полученных результатов; формулировке выводов и

практических рекомендаций на их основе; в подготовке публикаций в журналах и докладов на конференциях.

Соответсветвие паспорту специальности. Тема соответсвует пункту 1 «Разработка новых металлических, неметалических и композициоых материалов в том числе, капилярно-пористых, с заданным комплексом свойств путем установления фундаментальных закономерностей влияния дисперсности, состава, сутруктуры технологии, а также экспутационных и иных факторов на функциональные свойства материалов.» 2 «Установление закономерностей физико-химических и физико-механических процессов, поисходящих в гетерогенных и композиционных структурах.» 3 «Разработка научных основ выбора металлических, неметаллических и композиционных материаолов с заданными свойствами применительно к конкретными условиям изготовления и эксплутации деталей, изделей машин и конструкций.» 4 «Разработка физико-химических и физико-механических процессов формирования новых металлических, неметаллических и композиционных материалов.» 10 «Разработка способов повышения коррозионной стойкости металических, неметаллических и композиционных материалов в различных условиях эксплуатации.»

Публикации. По результатам исследований опубликовано 14 научных работ, из них 7 в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и получен малый патент Республики Таджикистан (№ TJ 1545).

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав и приложения, изложена на 178 страницах компьютерного набора, включает 63 рисунков, 48 таблиц, 134 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 применениям и свойства свинцовых сплавов и их теплофизические свойства; особенности окисления и коррозионно-электрохимического поведения свинцовых 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 магнием, цинком и кадием.

ГЛАВА II. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВИНЦОВОГО БАББИТА Б(PbSb15Sn10) С МАГНИЕМ, ЦИНКОМ И КАДМИЕМ

Исследование микроструктуры играет ключевую роль в анализе свойств сплавов, позволяя оценить влияние различных видов деформации и термической обработки на характеристики готовых баббитовых изделий. Кроме того, микроструктурный анализ помогает выявить причины появления дефектов в материале.

Для таких исследований используются металлографические микроскопы, предназначенные для изучения непрозрачных объектов в отражённом свете. При наблюдении микроструктуры в металлографическом микроскопе становится возможным детальное рассмотрение минимального участка микрошлифа. В частности, структура свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), модифицированного магнием, цинком и кадмием, была проанализирована с применением светового микроскопа марки KP-L3230-K.

Для исследования микроструктуры исследуемых образцов из полученного расплава отливались цилиндрические образцы диаметром 10-16 мм и толщиной 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 магнием, цинком и кадмием приведены на рис. 1. Видно кристаллы SbSn на фоне тройной эвтектики Pb+SbSn+γ, а также небольшое количество иглообразных кристаллов химических соединения SnSb, PbMg, PbZn, PbCd. Баббит на основе свинца по составу лежит на линии Pb-SnSb, поэтому его кристаллизация закончится образованием двойной эвтектики α(Pb) + β(SnSb).

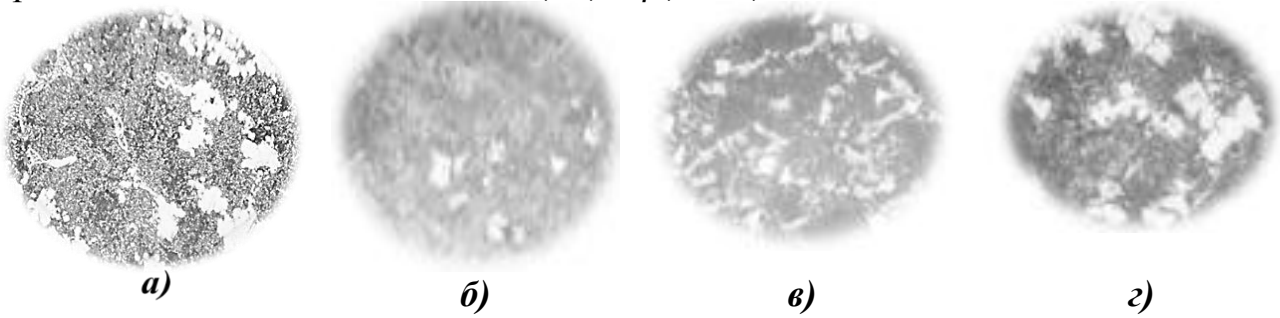

Рисунок 1. Микроструктура (х500) свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) (*а*) с 2,0 мас.% магнием (*б*), цинком (*в*) и кадмием (*г*).

Добавки магний, цинк и кадмий особенно от 0,1 до 2,0 масс. % значительно измельчают структурные составляющие исходного сплава.

Использовали твердомера MODEL HBRV-187.5D для проведения опытов при приложении нагрузки в P = 250 кг и применении шарика диаметром D=10 мм. В экспериментах участвовали образцы сплавов толщиной свыше 6 мм и диаметром 16 мм.

Установлена приближённая взаимосвязь между пределом прочности металла и его твёрдостью по шкале Бринелля,

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

Значение k для свинцовых сплавов равно 0,07. С учётом этого пересчитано значение $\sigma_{в}$ сплавов. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Твёрдость и прочность свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), легированного магнием, цинком и кадмием.

Содержание магния, цинка и кадмия в баббите, мас.%	*Твёрдость НВ, кгс/мм²	*Твёрдость НВ, МПа	Расчетная прочность, МПа
0,0	22,86	224,18	15,70
0,1Mg	23,45	229,96	16,09
0,5Mg	25,15	246,63	17,26
1,0Mg	27,67	271,35	19,00
2,0Mg	30,11	295,27	20,67
0,1Zn	23,91	234,47	16,41
0,5 Zn	26,47	259,58	18,17
1,0Zn	28,06	275,17	19,26
2,0Zn	32,12	314,98	22,05
0,1Cd	23,02	225,74	15,80
0,5Cd	24,65	241,73	16,92
1,0Cd	26,16	256,54	17,95
2,0Cd	28,74	281,84	19,72

**среднее значение определили по результатам 3 измерений.*

В таблице 1 представлены данные, согласно которым введение легирующих элементов магнием, цинком и кадмием в концентрации до 2,0 мас.% способствует увеличению твёрдости и прочности исходного сплава. Посреди исследованных добавок наиболее выраженное положительное влияние оказывает цинк, обеспечивая улучшенные механические характеристики материала

Определение теплоёмкость сплава. Одним из методов, позволяющих корректно установить теплоёмкость $C_P^0 = f(T)$ 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

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

где $m_1 = \rho_1 V_1$ –масса эталона;
$m_2 = \rho_2 V_2$–масса исследуемого образца;
$(\frac{dT}{d\tau})_1$, $(\frac{dT}{d\tau})_2$ - скорости охлаждения образцов из эталона и исследуемых сплавов при данной температуре.

При оценке скорости охлаждения изученных материалов были построены кривые, демонстрирующие зависимость температуры от времени при охлаждении в неподвижном воздушном области. На рисунке 2 приставляется экспериментальные кривые, полученные для свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), легированного магнием. Температурные измерения выполнялись с шагом 0,1 К, а фиксация значений осуществлялась каждые 10 секунд. Степень точности измерения температуры изменялась в зависимости от диапазона: в интервале 40–400 °C отклонение составляло ±1%, а при температурах выше 400 °C достигало ±2,5%. В соответствии с предложенной методикой погрешность определения теплоёмкости не превышала 4%, тогда как в рамках данного исследования её значение не превышало 1%. Все полученные анализы была обработаны с использованием MS Excel, а графическое представление данных выполнено в Sigma Plot 10.0. Коэффициент корреляции составил не менее 0,999.

Полученные кривые охлаждения образцов из полученных сплавов (рис. 2*а*) 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 магнием представлены на рис. 2*б*.

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 магнием. В таблице 4 и на рисунке 3*а* обобщены результаты расчётов величины теплоёмкости для рассматриваемых сплавов. Показано, что величина теплоёмкости свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) увеличивается при введении магния в качестве легирующего компонента баббита в количествах от 0,1 до 2,0 мас. %, что наглядно видно из зависимостей величин теплоёмкости баббитов от концентрации легирующего компонента (рис. 3*а*).

Затем проведя полиномную регрессию получили следующую общую уравнению для описания температурной зависимости теплоемкости сплавов:

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

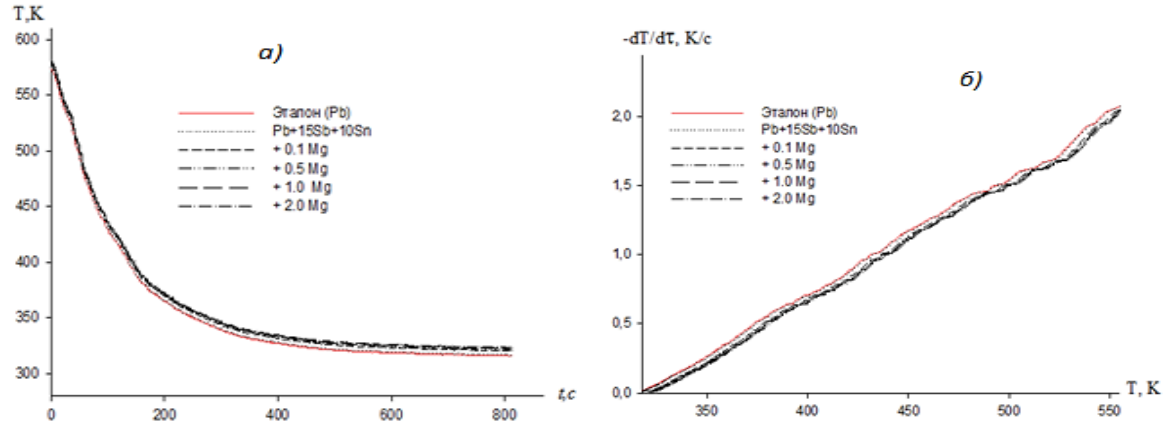

Рисунок 2. Термограммы (*а*) и зависимость скорости охлаждения от температуры (*б*) образцов из свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием и эталона (Pb марки С00)

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

Содержание магния в баббите, мас.%	*a*, К	$b \cdot 10^{-2}$, c^{-1}	*p*, К	$k \cdot 10^{-4}$, c^{-1}	$a \cdot b$, $Кс^{-1}$	$pk \cdot 10^{-3}$, $Кс^{-1}$
0,0	264,4375	0,887	309,6798	0,277	2,34	8,59
0,1	264,4435	0,887	326,8846	0,263	2,35	8,59
0,5	264,4437	0,887	328,2844	0,262	2,35	8,59
1,0	264,4400	0,887	328,6796	0,261	2,35	8,59
2,0	264,4382	0,887	329,6794	0,260	2,35	8,59
Эталон	264,4382	0,886	308,6799	0,278	2,34	8,59

Значения коэффициентов уравнения (5) для свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием, представлены в таблице 3.

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

Содержание магния в баббите, мас.%	*a*, $Дж/(кг \cdot К)$	*b*, $Дж/(кг \cdot К^2)$	$c \cdot 10^{-3}$, $Дж/(кг \cdot К^3)$	$d \cdot 10^{-5}$, $Дж/(кг \cdot К^4)$	Коэффициент корреляции R^2
0,0	150,5740	-0,0852	3,65	-0,0297	0,999
0,1	151,3212	-0,0847	3,65	-0,0297	0,999
0,5	154,4301	-0,0828	3,64	-0,0297	0,999
1,0	158,1952	-0,0804	3,64	-0,0297	0,999
2,0	165,7914	-0,0756	3,63	-0,0296	0,999
Эталон	105,600	0,0940	-0,085	0,005	1,0

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

Содержание магния в баббите, мас.%	T, K					
	300	350	400	450	500	550
0,0	149,83	152,72	155,88	159,07	162,08	164,70
0,1	150,74	153,65	156,83	160,05	163,09	165,73
0,5	154,33	157,30	160,54	163,81	166,90	169,58
1,0	158,81	161,91	165,26	168,66	171,87	174,67
2,0	167,78	171,10	174,68	178,30	181,74	184,77
Эталон	127,50	130,23	132,80	135,24	137,60	139,90

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 магнием по формуле

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

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

На рисунке 3*б* приведены результата расчёта коэффициента теплоотдачи свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием, в зависимости от температуры. Добавки магния и температура увеличивают коэффициент теплоотдачи баббита Б(PbSb15Sn10).

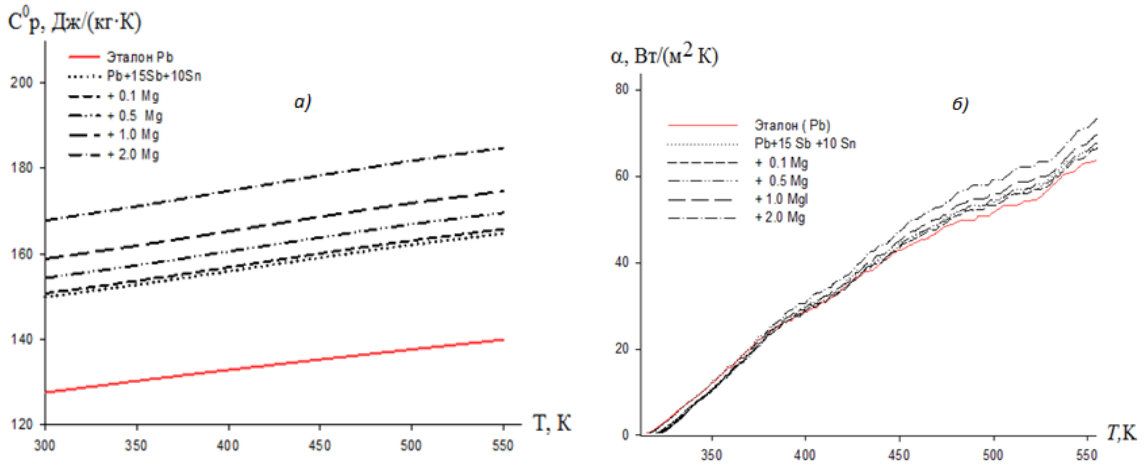

Рисунок 3. Температурная зависимость теплоёмкости (*а*) и коэффициента теплоотдачи (*б*) свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием и эталона (Pb марки С00)

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

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

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

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

где T_0 = 298,15 К.

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

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

Т, К	Эталон	Содержание магния в баббите, мас.%				
		0,0	0,1	0,5	1,0	2,0
	$[H^0(T) - H^0(T_0)]$, кДж/кг для баббитов					
300	0,235	0,274	0,278	0,284	0,293	0,310
350	6,679	7,775	7,887	8,042	8,310	8,781
400	13,256	15,422	15,648	15,952	16,489	17,425
450	19,957	23,235	23,571	24,021	24,837	26,250
500	26,779	31,199	31,651	32,245	33,352	35,252
550	33,717	39,303	39,874	40,610	42,017	44,414
$[S^0(T) - S^0(T_0)]$, кДж/(кг·К) для бабитов						
300	0,0007	0,0009	0,0009	0,0009	0,0009	0,0010
350	0,020	0,0240	0,0243	0,0248	0,0256	0,0271
400	0,0382	0,0444	0,0451	0,0459	0,0475	0,0502
450	0,0539	0,0628	0,0637	0,0649	0,0671	0,0710
500	0,0684	0,0796	0,0807	0,0823	0,0851	0,0899
550	0,0816	0,0950	0,0964	0,0982	0,1016	0,1074
$[G^0(T) - \ G^0(T_0)]$, кДж/кг для бабитов						
300	-0,0007	-0,0008	0,0008	-0,0008	-0,0009	-0,0009
350	-0,5476	-0,6377	-0,6469	-0,6597	-0,6816	-0,7202
400	-2,0275	-2,3599	-2,3939	-2,4410	-2,5224	-2,6653
450	-4,3391	-5,0504	-5,1233	-5,2230	-5,3984	-5,7047
500	-7,4033	-8,6188	-8,7432	-8,9119	-9,2129	-9,7363
550	-11,156	-12,9920	13,1797	-13,4316	-13,8878	-14,6777

Результаты исследования теплоёмкости и изменений термодинамических функций свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием показывают, что легирующий компонент в изученном концентрационном интервале (0,1 – 2,0 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 (магнием, цинком и кадмием) на примере сплавов, содержащих 2,0 мас. % добавки. Видно, что с ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значения энергии Гиббса уменьшается. При переходе от сплавов с магнием к сплавам с цинком и кадмием теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов уменьшаются, значение энергии Гиббса имеет обратную зависимость.

Таблица 6. Температурная зависимость и термодинамических функции свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с 2 мас.% магнием, цинком и кадмием

Т, К	$[H^0(T) - H^0(T_0)]$, кДж/кг для баббитов			
	Содержание магния, цинка и кадмия в баббите, мас.%			
	0,0	2.0Mg	2,0Zn	2,0Cd
300	0,235	0,342	0,286	0,310
400	13,256	19,386	16,095	17,425
500	26,779	39,511	32,554	35,252
$[S^0(T) - S^0(T_0)]$, кДж/(кг·К) для баббитов				
300	0,0007	0,0010	0,0009	0,0010
400	0,0382	0,0556	0,0463	0,0502
500	0,0683	0,1007	0,0830	0,0899
$[G^0(T) - G^0(T_0)]$, кДж/кг для баббитов				
300	-0,0007	-0,0011	-0,0008	-0,0009
400	-2,0275	-2,9560	-2,4623	-2,6653
500	-7,4033	-10,849	-8,9928	-9,7363

ГЛАВА III. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК МАГНИЯ, ЦИНКА И КАДМИЯ НА КИНЕТИКУ ОКИСЛЕНИЯ СВИНЦОВОГО БАББИТА Б(PbSb15Sn10), В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

В этой главе приведены результаты исследования влияния добавок магния, цинка и кадмия на кинетику окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), в твердом состоянии. Для этого была синтезирована серия сплавов с содержанием от 0.1 до 2.0% по массе щелочных металлов (Mg, Zn, Cd). Исследование проводили термогравиметрического методом в атмосфере воздуха при температурах 373 К, 423 К и 473 К.

Результаты исследования кинетики окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием представлены на рисунках 4-7 и в таблицах 7, 8. В таблице 7 обобщены рассчитанные значения кинетических и энергетических характеристик процесса окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием.

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

Содержание магния в баббите, мас. %	Температура окисления, К	Истинная скорость Окисления $K \cdot 10^4$, кг·м$^{-2}$·с$^{-1}$	Кажущаяся энергия активации, кДж/моль
0.0	373 423 473	2.48 2.53 2.60	58.30
0.1	373 423 473	2.75 2.83 2.89	51.50
0.5	373 423 473	2.83 2.90 2.94	47.99
1.0	373 423 473	2.90 2.96 2.99	44.10
2.0	373 423 473	2.95 3.00 3.04	40.00

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. 4).

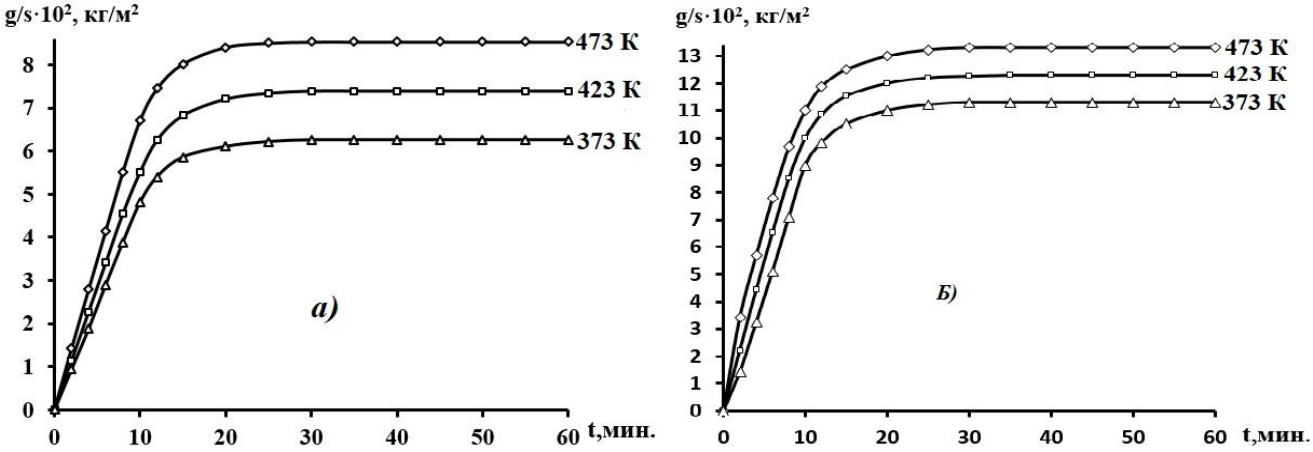

Рисунок 4. Кинетические кривые окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) (*а*), содержащего 2,0 мас. % магния (*б*).

Квадратичные кинетические кривые процесса окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием имеют не прямолинейный вид, что свидетельствует о не параболическом характере процесса окисления сплавов

(рис. 5). В таблице 8 приведены полиномы квадратичных кинетических виде кривых окисления сплавов, которые описываются общим уравнением

$$y = k \cdot x^n, \qquad (10)$$

где значения $n = 1 \div 4$.

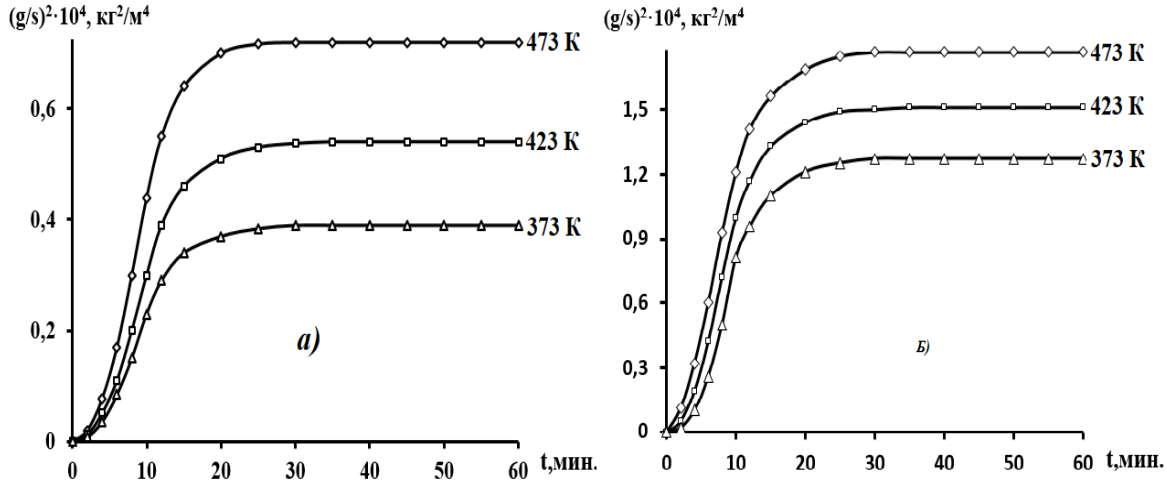

Рисунок 5. Квадратичные кинетические кривые окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) (*а*), содержащего 2,0 мас. % магния (*б*)

Таблица 8. Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием, в твёрдом состоянии

Содержание магния в баббите, мас.%	Температура окисления, К	Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления сплавов	Коэффициент регрессии R
0.0	373	$y = -0{,}6 \cdot 10^{-2}x^4 + 0{,}4 \cdot 10^{-3}x^3 - 2{,}52 \cdot 10^{-2}x^2 + 0{,}6701x$	0,990
	423	$y = -0{,}6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0{,}4 \cdot 10^{-3}x^3 - 2{,}88 \cdot 10^{-2}x^2 + 0{,}7769x$	0,992
	473	$y = -0{,}6 \cdot 10^{-4}x^4 + 0{,}6 \cdot 10^{-3}x^3 - 3{,}75 \cdot 10^{-2}x^2 + 0{,}9551x$	0,993
0.1	373	$y = -0{,}6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0{,}5 \cdot 10^{-3}x^3 - 3{,}54 \cdot 10^{-2}x^2 + 0{,}9991x$	0,984
	423	$y = -0{,}6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0{,}8 \cdot 10^{-3}x^3 - 4{,}85 \cdot 10^{-2}x^2 + 1{,}2171x$	0,993
	473	$y = -0{,}6 \cdot 10^{-7}x^4 + 1{,}1 \cdot 10^{-3}x^3 - 6{,}24 \cdot 10^{-2}x^2 + 1{,}4434x$	0,998
0.5	373	$y = -0{,}6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0{,}6 \cdot 10^{-3}x^3 - 3{,}76 \cdot 10^{-2}x^2 + 1{,}0567x$	0,982
	423	$y = -0{,}6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0{,}8 \cdot 10^{-3}x^3 - 5{,}03 \cdot 10^{-2}x^2 + 1{,}2692x$	0,992
	473	$y = -0{,}6 \cdot 10^{-8}x^4 + 1{,}2 \cdot 10^{-3}x^3 - 6{,}51 \cdot 10^{-2}x^2 + 1{,}5072x$	0,997
1.0	373	$y = -0{,}6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0{,}6 \cdot 10^{-3}x^3 - 4{,}12 \cdot 10^{-2}x^2 + 1{,}1317x$	0,983
	423	$y = -0{,}6 \cdot 10^{-6}x^4 + 0{,}9 \cdot 10^{-3}x^3 - 5{,}46 \cdot 10^{-2}x^2 + 1{,}3532x$	0,992
	473	$y = -0{,}6 \cdot 10^{-8}x^4 + 1{,}3 \cdot 10^{-3}x^3 - 6{,}95 \cdot 10^{-2}x^2 + 1{,}5908x$	0,997
2.0	373	$y = -0{,}6 \cdot 10^{-4}x^4 + 0{,}7 \cdot 10^{-3}x^3 - 4{,}55 \cdot 10^{-2}x^2 + 1{,}2132x$	0,986
	423	$y = -0{,}6 \cdot 10^{-7}x^4 + 1{,}1 \cdot 10^{-3}x^3 - 6{,}18 \cdot 10^{-2}x^2 + 1{,}4697x$	0,995
	473	$y = -0{,}6 \cdot 10^{-3}x^4 + 1{,}4 \cdot 10^{-3}x^3 - 7{,}7 \cdot 10^{-2}x^2 + 1{,}712x$	0,996

Примечание: y - привес массы образцов, (кг/м²);*
*x**- продолжительность времени окисления, (t, мин.).*

Изохроны окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием, представлены на рис. 6. Видно, что с увеличением концентрации магния 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 магния.

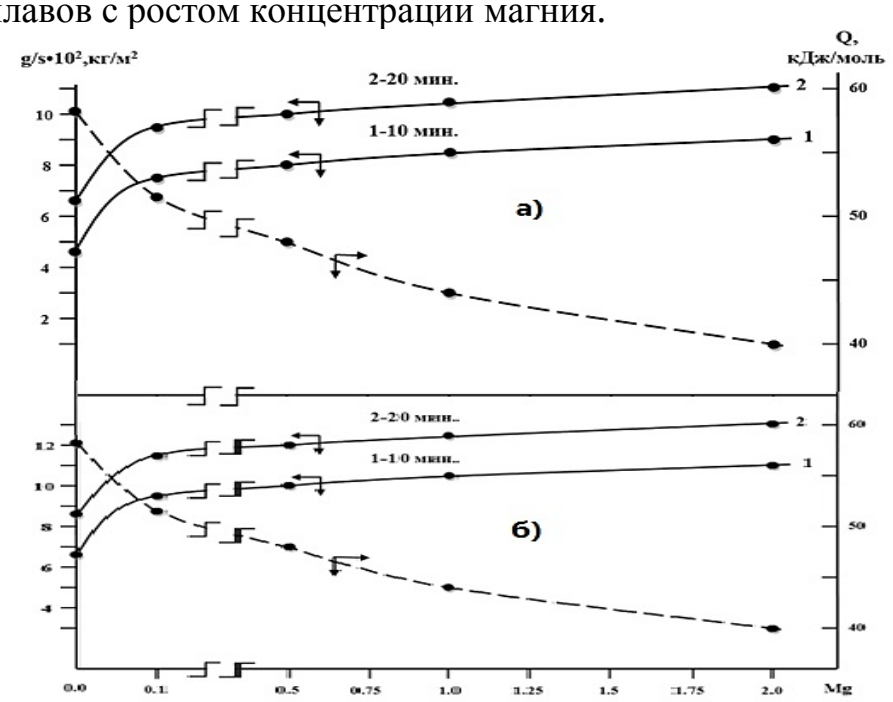

Рисунок 6. Изохроны окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием при 373 К (*а*) и 473 К (*б*)

На рис. 7 изображена зависимость $-lgK = f(1/T)$ для свинцового баббиты Б(PbSb15Sn10), содержащего 0,1 – 2,0 мас. % магния, которые имеют прямолинейный характер. По тангенсу угла наклона данных прямых были определена величина кажущейся энергии активации процесса окисления сплавов.

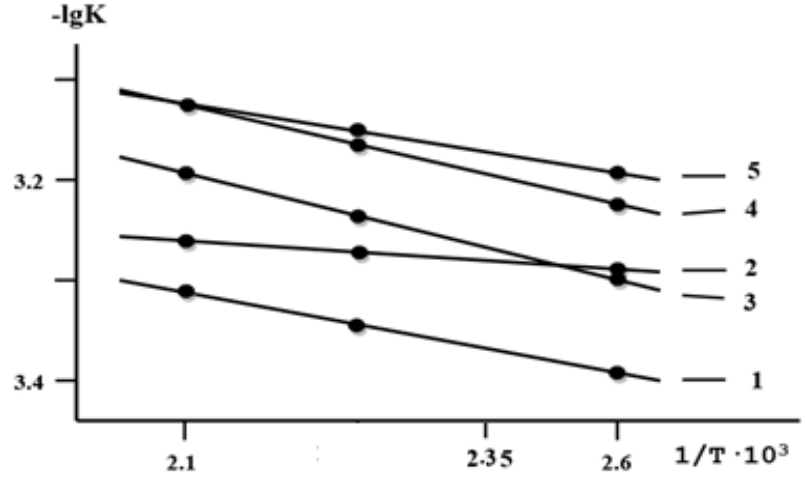

Рисунок 7. Зависимость $-lgK = f(1/\mathrm{T})$ для свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) (*1*) с магнием, мас. %: 0,1(*2*); 0,5(*3*); 1,0(*4*); 2,0(*5*)

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 межплоскостных расстояний dhkl с подобных характеристик известных веществ. Съемка проводилась в излучении CuKα (λ=1,7902A), при напряжении анода 30кВ, силе тока 30мА и интервале углов 2θ от 5 до 150º. По результатам рентгенофазового анализа продуктов окислений баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием установлено, что при окислении сплавов образуются оксиды: $Pb_2Sn_2O_6$; MgO; Pb_2O; $Mg(Sb_2O_5)$ (рис. 8).

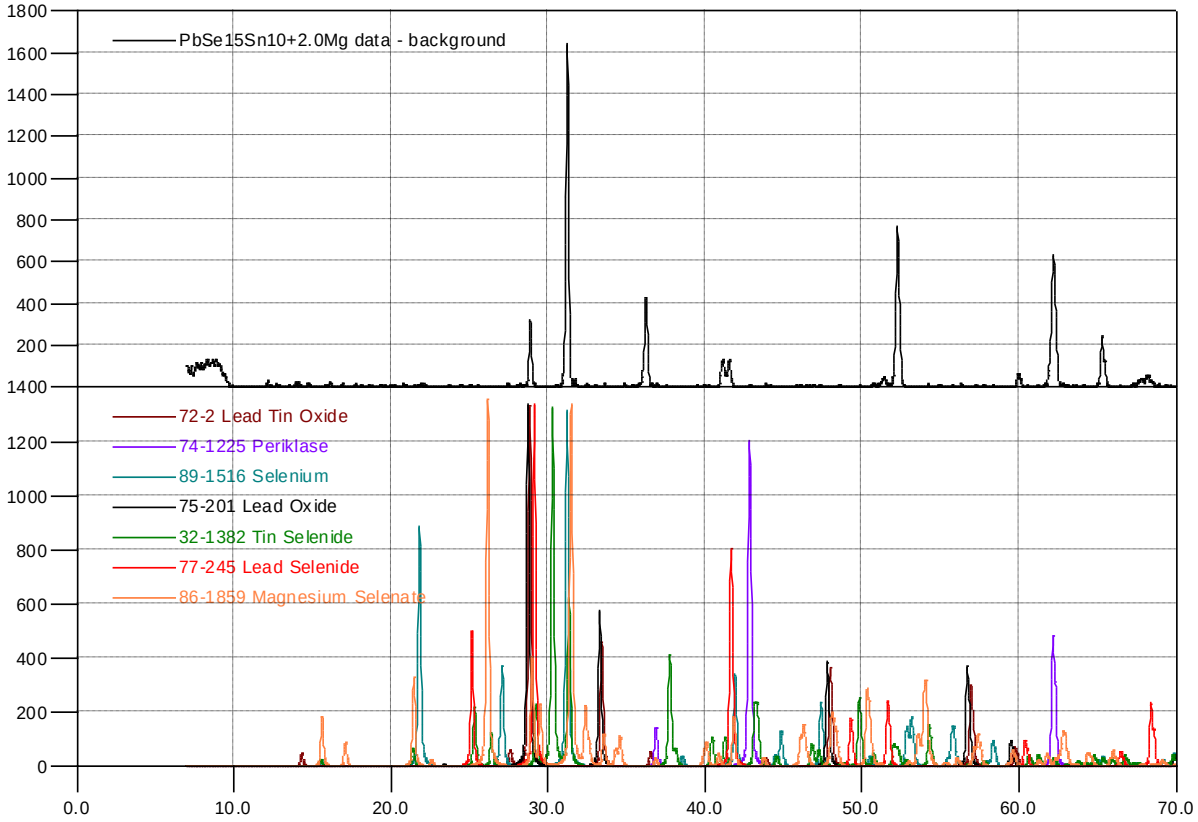

Рисунок 8. Дифрактограммы продуктов окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием

Обязующиеся при окислении свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием одинарные оксиды и оксиды типа шпинелей (MgO, Mg(Se2O5) не обладают достаточным защитными свойствами и поэтому отмечается рост скорости окисления от содержания легирующей добавки и температуры.

По результатам проведённых исследований можно выявить некоторые закономерности изменения величины кажущейся энергии активации процесса окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием, цинком и кадмием. Из таблицы 9 видно, что при переходе от баббита с магния к баббитам с цинком и кадмием наблюдается уменьшение величины эффективной энергии активации процесса окисления.

Таблица 9. Сравнительное значение кажущейся энергии (кДж/моль) активации процесса окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием, цинком и кадмием

Содержание легирующих компонентов в баббите, мас.%	Кажущаяся энергия активации окисления, кДж/моль				
	Содержание добавки в баббите, мас.%				
	0,0	0,1	0,5	1,0	2,0
Mg	58,30	51,5	48,0	44,10	40 ,0
Zn		46,10	42,0	38,5	34,9
Cd		43,0	38,0	35,10	31,5

Экспериментальное изучение кинетики окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), легированного магнием, цинком и кадмием, позволило установить, что максимальная скорость окисления характерна для сплавов с кадмием, тогда как минимальная — для баббитов с магнием. Свинцовый баббит, содержащий цинк, демонстрирует промежуточные значения. Результаты исследования также подтвердили, что введение легирующих компонентов существенно увеличивает склонность исходного свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) к окислению.

ГЛАВА IV. ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОСТОЙКОСТИ СВИНЦОВОГО БАББИТА Б(PbSb15Sn10), ЛЕГИРОВАНИЕМ МАГНИЕМ, ЦИНКОМ И КАДМИЕМ

Исследования коррозионно-электрохимических свойств сплавов проводили на потенциостате ПИ-50-1-1 потенциостатическом методом в потенциодинамическом режиме при скорости развертки потенциала 2 мВ/с, с помощью программатора ПР-8 и самозаписа ЛКД-4. Температура раствора поддерживалась постоянно 20°С, 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 $1А/м^2$ (рис. 9, кривая *I*). Далее образцы поляризовались в противоположном направлении (рис. 9, кривые *II* и *III* до потенциала (–1,200 В), что привело к растворению оксидной пленки с поверхности образцов. Наконец, образцы снова поляризовали в положительном направлении, чтобы получить анодные поляризационные кривые сплавов (рис. 9, кривая *IV*). На рис. 9 показаны все четыре потенциодинамические кривые образцов, снятые в среде электролита 3,0%-ного NaCl. Пунктирными линиями обозначены обратные поляризационные кривые.

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 ($b_к = 0{,}12$ В) из катодной ветви потенциодинамических кривых.

Скорость коррозии k определяли по току коррозии ($i_{кор.}$) по формуле

$$K = i_{кор.} \cdot k \qquad (11)$$

где $k = 3{,}865$ г/Ач электрохимический эквивалент свинца.

Обобщённое результаты исследований коррозионно-электрохимических свойств свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с металлами (магнием, цинком, кадмием) представлен в таблицах 9, 10. Видно, что добавки магния, цинка и кадмия от 0,1 до 2,0 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).

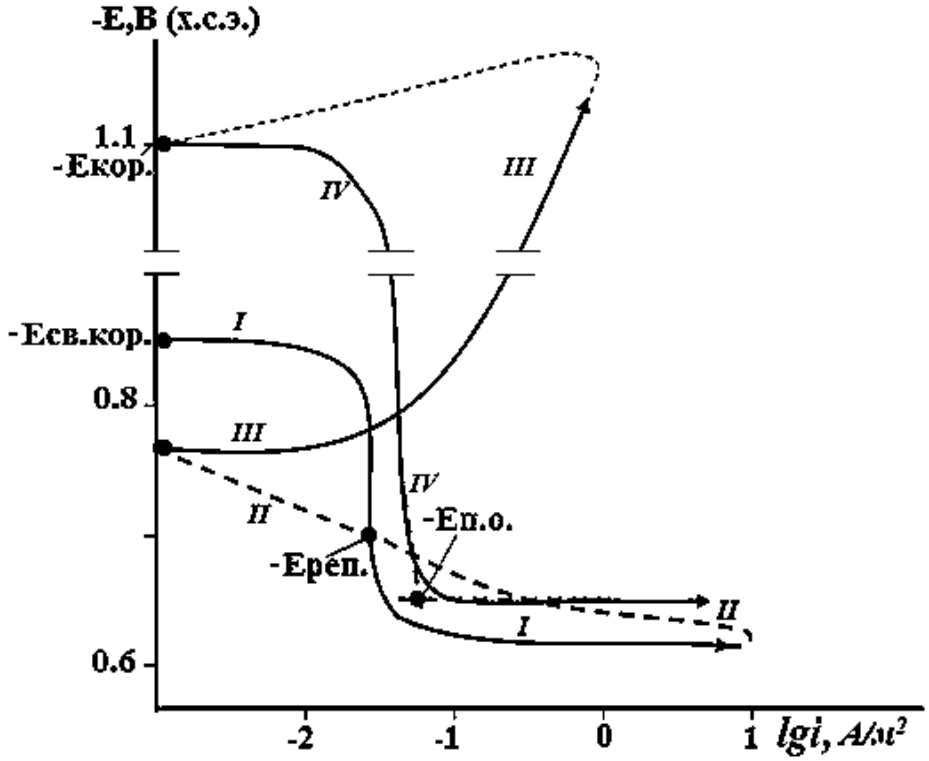

Рисунок 9. Полная поляризационная (2мВ/с) кривая свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), в среде электролита 3,0 %-ного NaCl

Таблица 9. Потенциалы (х.с.э.) свободной коррозии и питтингообразования свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием, цинка и кадмием, в среде электролита NaCl

Среда NaCl	Содержание Mg, Zn и Cd в баббите	Баббит с Mg		Баббит с Zn		Баббит с Cd	
		$-E_{св.кор.}$	$-E_{п.о.}$	$-E_{св.кор.}$	$-E_{п.о.}$	$-E_{св.кор.}$	$-E_{п.о.}$
мас. %		В (х.с.э.)					
0,03	0,0	0,612	0,510	0,612	0,510	0,612	0,510
	0,1	0,540	0,445	0,540	0,426	0,518	0,414
	0,5	0,520	0,435	0,520	0,417	0,496	0,406
	1.0	0,505	0,425	0,505	0,409	0,483	0,398
	2,0	0,490	0,415	0,477	0,400	0,467	0,390
0,3	0,0	0,720	0,595	0,720	0,595	0,720	0,595
	0,1	0,626	0,498	0,606	0,486	0,590	0,475
	0,5	0,612	0.489	0,594	0,477	0,577	0,467
	1,0	0,595	0,480	0,583	0,469	0,568	0,459
	2,0	0,580	0,471	0,569	0,460	0,554	0,451
3,0	0,0	0,850	0,650	0,850	0,650	0,850	0,650
	0,1	0,750	0,554	0,736	0,540	0,721	0,522
	0,5	0,737	0,554	0,724	0,531	0,709	0,513
	1,0	0,726	0,535	0,711	0,522	0,698	0,505
	2,0	0,713	0,525	0,700	0,513	0,685	0,496

Механизм действия 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 10 значений скорости коррозии свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) следует, что добавки в пределах 0,1÷2,0 мас. % способствуют снижение скорости коррозии и плотности тока коррозии сплавов на 25-40%.

Таблица 10. Зависимость скорости коррозии свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магния, цинка и кадмия в среде электролита NaCl

Содержание магния, цинка и кадмия в баббите, мас. %	Среда NaCl, мас %					
	0,03%		0,3%		3,0%	
	$i_{кор.} \cdot 10^2$, А/м^2	К•10^{-3}, г/м^2·ч	$i_{кор.} \cdot 10^2$, А/м^2	К•10^{-3}, г/м^2·ч	$i_{кор.} \cdot 10^2$, А/м^2	К•10^{-3}, г/м^2·ч
0,0	0,56	21,64	0,75	28,98	0.90	34.78
0,1Mg	0.45	17.39	0.64	24.73	0.79	30.53
0,5 Mg	0.43	16.61	0.62	23.96	0.77	29.76
1,0 Mg	0.41	15.84	0.60	23.19	0.75	28.98
2,0 Mg	0.39	15.07	0.58	22.41	0.73	28.21
0,1 Zn	0.42	16.23	0.60	23.19	0.75	28.95
0,5 Zn	0.40	15.46	0.58	22.41	0.73	28.21
1,0 Zn	0.38	14.68	0.56	21.64	0.71	27.44
2,0 Zn	0.36	13.91	0.54	20.87	0.69	26.66
0,1Cd	0.39	15.07	0.57	22.03	0.72	27.82
0,5 Cd	0.37	14.30	0.55	21.25	0.70	27.05
1,0 Cd	0.35	13.57	0.53	20.48	0.68	26.28
2,0 Cd	0.33	12.75	0.51	19.71	0.66	25.50

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальном методом установлено, что добавление магния, цинка и кадмия оказывает положительное влияние на механические характеристики свинцового баббита Б(PbSb15Sn10). С увеличением концентрации легирующих элементов происходит рост показателей твердости и прочности материала. Металлографический анализ продемонстрировал, что при содержании магния, цинка и кадмия до 2,0 мас.% значительно уменьшается размер структурных компонента начального образца.

2. В режиме «охлаждения» изучена зависимость теплоёмкости свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), легированного магнием, цинком и кадмием, от температуры. Выявлено, что повышение температуры способствует увеличению теплоёмкости сплавов, а также содержания легирующих элементов. При

сравнении свойств сплавов с магнием, цинком и кадмием наблюдается снижение теплоёмкости при переходе сплавов с магнием к сплавам кадмием.

3. Изучение термодинамических характеристик свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), магнием, цинком и кадмием, выявило снижение энтальпии и энтропии при переходе от сплавов с магнием к сплавам с цинком, тогда как энергия Гиббса демонстрирует противоположную динамику. Кроме того, снижение энергии Гиббса с увеличением температуры наблюдается рост энтальпии и

4. С использованием термогравиметрического анализа изучены особенности кинетики окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), легированного магнием, цинком и кадмием. Показано, что этом наибольшая кажущаяся энергия активации зафиксирована для исходного баббита Б(PbSb15Sn10), тогда как минимальные значения отмечены у сплава с кадмием. Установлено, что процесс окисления подчиняется гиперболической зависимости с истинной скоростью порядка 10^{-4} кг·м$^{-2}$·сек$^{-1}$.

5. Применение рентгенофазовый анализ, указывает на продукты окисления свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), с магнием, цинком и кадмием, представлены следующими оксидами: $Pb_2Sn_2O_6$; MgO; Pb_2O; $Mg(Se_2O_5)$; PbO; ZnO; SnO_2; Se_6; SnSe; $ZnSe_2O_5$; Pb_2SnO_4; Pb_3O_4; $Cd(SeO_3)$; $Pb_2Sn_2O_6$.

6. Анодное поведение свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), легированного магнием, цинком и кадмием, изучено методом потенциостатического анализа в режиме потенциодинамики со скоростью развертки потенциала 2 мВ/с. Результаты исследования показали, что добавление магния, цинка и кадмия в количестве до 2.0 мас.% увеличивает анодную устойчивость баббита в растворе электролита хлорида натрия на 20–40%. С увеличением концентрации хлорид-ионов в растворе хлорида натрия скорость коррозии свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) возрастает, что сопровождается смещением электрохимических потенциалов в отрицательную область. Также выявляется начальное смещение потенциалов в положительную область. Среды легирующих элементов именно кадмий демонстрирует наибольшую эффективность в увеличении устойчивости баббита к коррозийным процессам.

7. Исходя из проведённых исследований созданы новые составы сплавов, основанные на свинцовом баббите Б(PbSb15Sn10) с добавками магния, цинка и кадмия. Данные разработки защищены малым патентом Республики Таджикистан (Патент №TJ1545 от 13.06. 2024 г).

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

1. Установленные физико-химические параметры свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием, цинком и кадмием 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 их 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 производится 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 ПЕРЕЧЕНЬ ВАК РФ:

1. Ганиев, И.Н. Влияние цинка на теплофизические свойства и термодинамические функции свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) / И.Н. Ганиев, **М.Б. Джумъаева**, Х.М. Ходжаназаров // Инженерно-физический журнал. – 2025. – Т. 98, № 3. – С. 742-748 **(Scopus. Q-4).**

2. Ганиев, И.Н. Влияние кадмия на коррозионно-электрохимическое поведение свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) в среде раствора NaCl / И.Н. Ганиев, **М.Б. Джумъаева,** Х.М. Ходжаназаров // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2025. – Т. 61, № 5. – С. 560-565 **(Scopus. Q-3).**

3. Ганиев, И. Н. Теплоемкость и термодинамические функции свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), легированного магнием / И.Н. Ганиев, Х.М. Ходжаназаров, **М.Б. Джумъаева** // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2025. – № 1. – С. 104-109.

4. Ганиев, И.Н. Влияние добавки магния на анодную устойчивость свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) в среде водного раствора NaCl / И.Н. Ганиев, **М.Б. Джумъаева,** Х.М. Ходжаназаров // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2024. – № 3(163). – С. 109-118.

5. Ганиев, И.Н. Влияние цинка на коррозионно-электрохимическое поведение свинцового баббита б (PbSb15Sn10), в среде раствора NaCl / И. Н. Ганиев, **М.Б. Джумаева,** Х.М. Ходжаназаров // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2024. – № 3(102). – С. 64-74.

6. Ганиев, И. Н. Теплофизические и термодинамические функции свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с кадмием / И.Н. Ганиев, **М.Б. Джумъаева**, Х.М. Ходжаназаров, Р.С. Шоназаров // Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. Серия естественных наук. – 2024. – № 2-4-2(129). – С. 101-107.

7. Ганиев, И. Н. Микроструктура и механические свойства свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с кадмием / Х.М. Ходжаназаров, И.Н. Ганиев, Ф.Б. Шарипов, **М.Б. Джумъаева** // Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. Серия естественных наук. – 2024. – № 2/3-2(126). – С. 61-66.

ИЗОБРЕТЕНИЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

8. Малый патент Республики Таджикистан **№ TJ 1545**. Свинцовый баббит / Ганиев И.Н., Эшов Б.Б., **Джумъаева М.Б.,** Ходжаназаров Х.М**.,** Ходжаев Ф.К., Одиназода Ҳ.О. // №2401966; заявл.13.06.2024г., опубл. 18.10.2024г.

СТАТЬИ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В МАТЕРИАЛАХ МЕЖДУНАРОДНЫХ И РЕСПУБЛИКАНСКИХ КОНФЕРЕНЦИЙ:

9. Ганиев, И.Н. Влияние добавок магния на коррозионно-электрохимические свойства свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) в среде 0,03%-электролита NaCl // Ганиев И.Н., **Джумъаева М.Б.,** Ходжаназаров Х.М. // Сборник статей VI Международной научной конференции: «Вопросы физической и координационной химий», посвящённой «Двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования», 90-летию доктора химических наук, профессора Якубова Хамида Мухсиновича и памяти доктора химических наук, профессора Юсуфова Зухуриддина Нуриддиновича, 75-летию и 53-летию научно-педагогической деятельности доктора химических наук, профессора Рахимовой Мубаширхон (15-16 мая 2024 г.). Таджикский национальный университет. 2024.С.409-415.

10. Ганиев, И.Н. Анодное поведение свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием в среде электролита 3.0%-ного NaCl / Ганиев И.Н., **Джумъаева М.Б.,** Ходжаназаров Х.М., Мирзоалиев А.И. // Мат-лы межд. научно-практ. конф. “Роль химии и химической промышленности в ускоренной индустриализации страны”, посвящённая провозглашению 2020-2040 годов “Двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования” (24 мая 2024 года). ТТУ имени М.С. Осими. С.265-268.

11. Ганиев, И.Н. Коррозионно-электрохимические свойства свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), легированного цинком в среде раствора 0,03% NaCl / Ганиев И.Н**., Джумъаева М.Б.,** Ходжаназаров Х.М., Худойбердизода С.У. // XIX Нумановские чтения «Развитие фундаментальной и прикладной химии и её вклад в индустриализацию страны», Институт химии имени В.И. Никитина. г.Душанбе. 2024г. С.358-361.

12. Ганиев, И.Н. Расчёт коэффициента теплоотдачи свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), легированного магнием / Ганиев И.Н. **Джумъаева М.Б.,** Ходжаназаров Х.М., Назаров О.Н. // Мат. III международной научной конференции «Инновационное развитие науки». Центр по исследованию инновационных технологий НАН Таджикистана. 2024. С.61-64.

13. Ганиев, И.Н. Коррозионно-электрохимическое исследование свинцового баббита Б(PbSb15Sn10) с магнием в среде электролита 0.3%-ного NaCl / Ганиев И.Н., Ходжаназаров Х.М., **Джумъаева М.Б.** // Сборник матер. Респуб. научно–практ. конф. «Проблемы и тенденции развития точных, математических и естественных наук», посвященной двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук (28.05.2024г.). Российско–Таджикский (Славянский) университет. С.10-13

14. Ганиев, И.Н. Влияние цинка на коррозионно-электрохимическое поведение свинцового баббита Б(PbSb15Sn10), в среде раствора NaCl. / Ганиев И.Н., Ходжаназаров Х.М., Ходжаев Ф.К. **Джумъаева М.Б.** // XX Нумановские чтения «Современные этапы развития химических и технических наук: актуальные вопросы теории и практики» Душанбе. 22 октября 2025г. С. 242-244.

Сдано в печать 17.11.2025 г.
Подписано в печать 21.11.2025.
Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Тираж 100 экз.
Отпечатано в типографии
ООО «Сармад-Компания»
г. Душанбе, ул. Лахути 6, 1 проезд