ISSN 1999-4125 (Print) **ISSN 2949-0642 (Online)**

Научная статья
УДК 669.45.018.8.24/884
DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-107-117

КИНЕТИКА ОКИСЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОВОДНИКОВОГО СПЛАВА AlV0.1, ЛЕГИРОВАННОГО КАЛЬЦИЕМ, В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

Ганиев Изатулло Наврузович [1], Ашуров Кобилджон Хакимович [2], Окилов Шахром Шукурбоевич [1], Ганиева Наргис Изатуллоевна [2]

[1] ГНУ «Институт химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана»
[2] Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

[*] для корреспонденции: ganiev48@mail.ru

Аннотация.
Окисление алюминиевого проводникового AlV0.1 с кальцием играет двойственную роль в технике: с одной стороны, оно обеспечивает естественную защиту металла благодаря образованию прочной оксидной пленки, а с другой – может снижать эксплуатационные свойства изделий при разрушении этой пленки в агрессивных условиях. В работе представлены результаты исследования кинетики окисления алюминиевого проводникового сплава AlV0.1, легированного кальцием, выполненного термогравиметрическим методом. Установлено, что введение кальция в количестве от 0,01 до 1,0 мас. % приводит к увеличению скорости окисления исходного сплава AlV0.1, сопровождающемуся снижением кажущейся энергии активации процесса. Показано, что процесс окисления сплавов в изученном температурном интервале 723, 773 и 823К подчиняется гиперболической зависимости $y = kx^n$, где n = 1 – 4. Анализ квадратичных кинетических кривых окисления, построенных в виде зависимостей удельного привеса сплавов от времени, позволил выявить гиперболический механизм протекания процесса окисления. Методом рентгенофазового анализа был определен фазовый состав продуктов окисления алюминиевого проводникового сплава AlV0.1, легированного кальцием, а также установлена их роль в механизме окисления. Результаты РФА показали, что при окислении сплава AlV0.1, содержащего кальций, формируются следующие оксидные соединения: Al_2O_3; Al_2O; VO_{532}; VO_2, CaO; VO_2. Установлено, что добавки до 1,0 мас. % кальция как модификаторы структуры значительно измельчают микроструктуру исходного сплава AlV0.1, и она становится однородной и мелкозернистой. В результате проведенных исследований установлено, что структура изученных сплавов однотипная и состоит из твердого раствора алюминия и других фаз. Согласно диаграмме состояния системы Al-V структура сплава состоит из следующих фазовых составляющих: первичные кристаллы $Al_{10}V$ на фоне твердого раствора алюминия-фазы, эвтектическая (или частично перитектического происхождения) смесь кристаллов AlV0.1 с α(Al).

Информация о статье
Поступила:
28 марта 2026 г.

Одобрена после рецензирования:
01 сентября 2026 г.

Принята к публикации:
15 сентября 2026 г.

Ключевые слова:
алюминиевый проводниковый AlV0.1, кальций, термогравиметрический метод, кинетика окисления, истинная скорость окисления, кажущаяся энергия активации, микроструктура

Для цитирования: Ганиев И.Н., Ашуров К.Х., Окилов Ш.Ш., Ганиева Н.И. Кинетика окисления алюминиевого проводникового сплава AlV0.1, легированного кальцием, в твердом состоянии // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 4 (176). С. 107-117. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-107-117, EDN: RSOGRJ

Введение

Алюминий в электротехнике известен уже очень давно. Однако до недавнего времени область применения алюминия была ограничена линиями электропередачи и в редких случаях силовыми кабелями. В кабельной промышленности преобладали медь и свинец. Токопроводящие элементы конструкции кабелей были выполнены из меди, а металлическая оболочка – из свинца или сплавов на основе свинца. Многие десятки лет (впервые свинцовые оболочки для защиты кабельных жил были предложены в 1851 г.) свинец был единственным металлическим материалом для кабельных оболочек. Он прекрасен в этой роли, но не без недостатков: высокая плотность, невысокая прочность и дефицитность – только основные из них, которые заставили человека искать другие металлы, способные достойно заменить свинец [1–3].

Алюминиевые провода применяются для воздушных линий электропередачи. Но

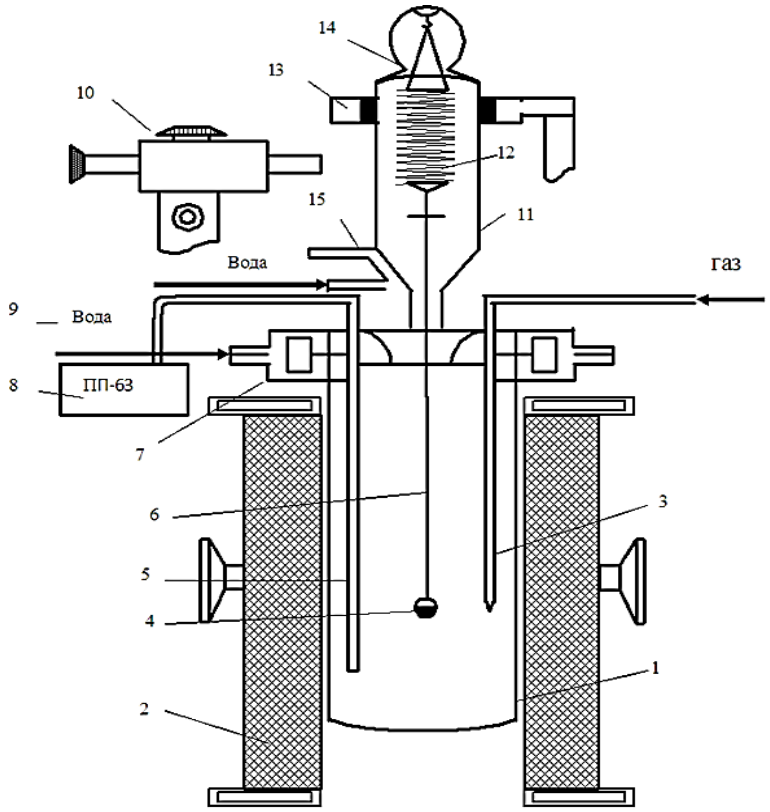


Рис. 1. Схема установки для изучения кинетики окисления металлов и сплавов
Fig. 1. Scheme of an installation for studying the kinetics of oxidation of metals and alloys

Рис. 2. Образец из алюминиевого проводникового AlV0.1
Fig. 2. Aluminum conductor sample AlV0.1

потребовалось много усилий, времени, чтобы выполнить равноценную замену. Вариантов разработано много, и используются они исходя из конкретной обстановки. Изготовляются алюминиевые провода повышенной прочности и повышенного сопротивления ползучести, что достигается легированием магнием, кремнием, железом и т. д. Находят применение сталеалюминевые провода, особенно для выполнения больших пролетов, необходимых в местах пересечения линиями электропередачи различных препятствий. Имеются пролеты более 1500 м, например, при пересечении рек. Современные провода должны сочетать в себе высокую электропроводность и прочность, сохраняющаяся вплоть до нагревов 150-300 ºС [4, 5].

Одним из основных недостатков алюминиевых проводников является их низкая прочность в сравнении с медными. Для решения этой задачи традиционно используют такие подходы, как введение в конструкцию провода армирующего стального или композитного сердечника или легирование алюминия в определенных пропорциях магнием и кремнием, т. е. применение сплавов системы Al-Mg-Si [4, 5].

Ванадий вводят в сплавы с помощью лигатур, которые получают двумя основными способами: сплавлением чистых компонентов и восстановлением легирующего металла из его соединений [6].

В литературе имеются сведения о влиянии добавки ванадия на различные свойства алюминия. В справочнике [7] сообщается, что увеличение удельного электросопротивления в пределах области растворимости ванадия в алюминий составляет $0,4 \div 0,5 \cdot 10^{-8}$Ом · м от каждого вводимого 0,1%V. Описана температурная зависимость электросопротивления. Магнитная восприимчивость при добавке в сплаве алюминия 1,0% V уменьшается на 15% [7].

Добавка кальция в алюминий влияет на его физико-химические свойства: она изменяет теплопроводность, теплоемкость, структуру и кинетику окисления. В малых концентрациях кальций может улучшать некоторые характеристики (например, измельчать зернистую структуру), но при больших добавках ускоряет окисление и снижает защитные свойства оксидной пленки. Таким образом, кальций в алюминии играет двойственную роль: он улучшает микроструктуру и теплофизические свойства, но одновременно снижает коррозионную стойкость и ускоряет окисление [7].

Цель настоящей работы заключается в исследовании влияния добавки кальция на кинетику окисления алюминиевого проводникового сплава AlV0.1 *(Al+0.1мас. % V)* в твердом состоянии.

Материалы и методика исследования

Для решения поставленной задачи применяли метод термогравиметрии с непрерывным взвешиванием образцов. Кинетику окисления сплавов исследовали в атмосфере воздуха по методике, описанной в работах [8–11]. Схема установки для исследования кинетики окисления сплавов приведена на Рис. 1. Основные части

Таблица 1. Кинетические и энергетические параметры процесса окисления алюминиевого проводникового AlV0.1 с кальцием в твердом состоянии
Table 1. Kinetic and energy parameters of the oxidation process of aluminum conductor AlV0.1 with calcium in the solid state

Содержание кальция в сплаве, мас. %	Температура окисления, К	Истинная скорость окисления $K \cdot 10^4$, кг·м$^{-2}$·с$^{-1}$	Кажущаяся энергия активации, кДж/моль
0.0	723 773 823	1.88 2.05 2.35	150.0
0.01	723 773 823	1.93 2.13 2.43	145.3
0.1	723 773 823	2.02 2.24 2.47	142.0
0.5	723 773 823	2.12 2.40 2.58	138.2
1.0	723 773 823	2.27 2.60 2.85	134.1

установки: печь Таммана (1) и ее чехол из оксида алюминия (2). При проведении экспериментов чехол в верхней части закрывается водоохлаждающими крышками (7). Крышки имеют отверстия для газопроводящей трубки (3), тигля (4) для образцов из сплавов и термопары (5). Образец подвешивается на платиновой нити (6) к пружине. Пружина (12) изготовлена из молибденовой проволоки. Пружину калибруют предварительно и вводят в баллон из молибденового стекла (11) с притертой крышкой (14). Чехол с пружиной закрепляют на подставке (13), независимой от печи, для исключения вибрации и сотрясений. Для защиты весов от теплового излучения печи на нижнем конце баллона используют трон и холодильник (15). По растяжению пружины с помощью катетометра КМ-8 осуществляется фиксация изменения масса образца. В наших опытах применены тигли из оксида алюминия диаметром 18-20 и высотой 25-26 мм. Перед опытом тигли прокаливались до постоянной массы при 1273-1473 К в окислительной среде в течение 1,5 часов до постоянной массы. Окисления сплавов в твердом состоянии проводили на воздухе при постоянной температуре 723, 773, 823 К.

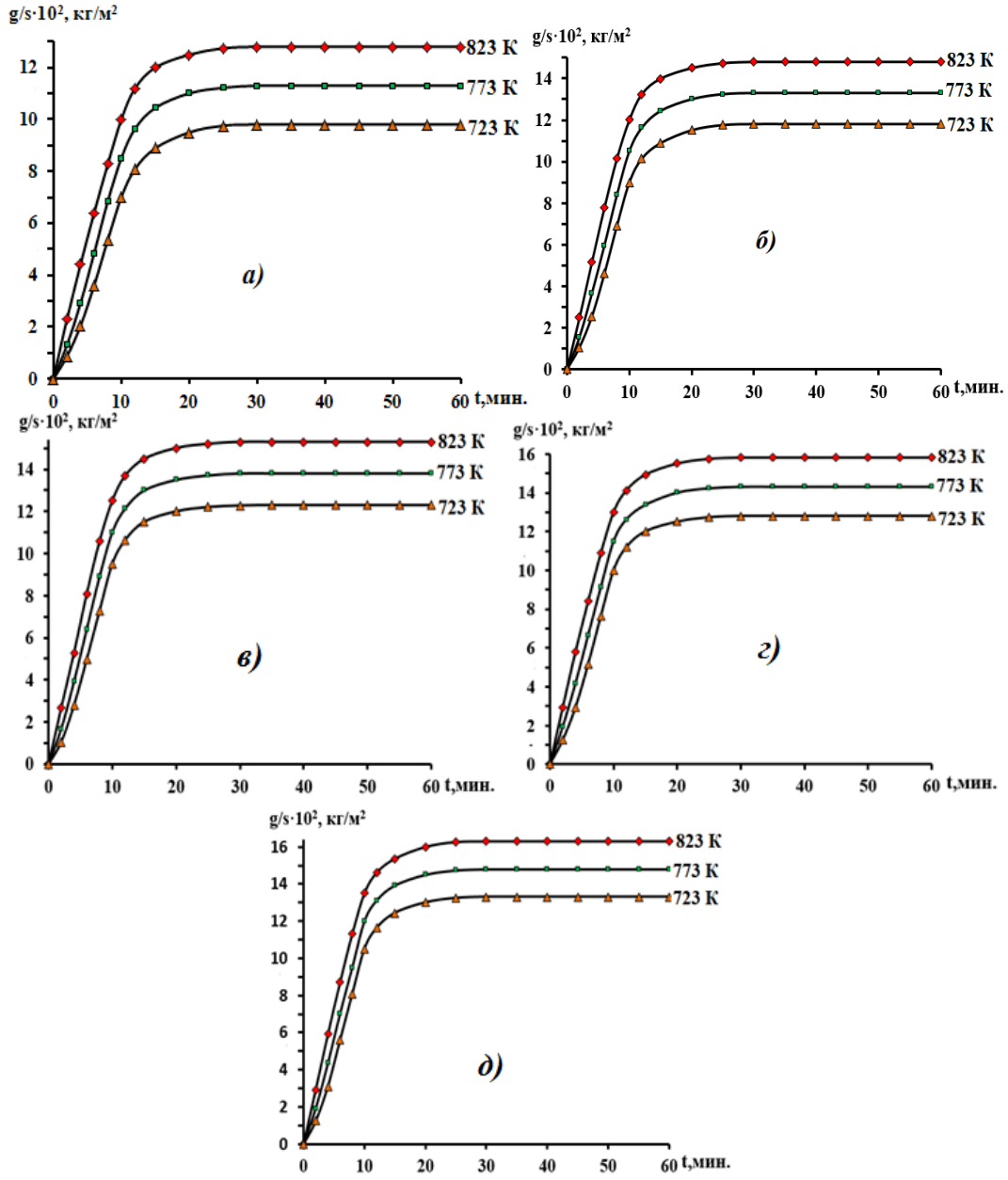


Рис. 3. Кинетические кривые окисления алюминиевого проводникового AlV0.1 (а), содержащего кальций, мас. %: 0,01(б); 0,1(в); 0,5(г); 1,0(д)

Fig. 3. Kinetic curves of oxidation of aluminum conductor AlV0.1 (a) containing calcium by wt. %: 0.01(b); 0.1(c); 0.5(d); 1.0(e)

Тигель с исследуемым металлом помещался в изотермическую зону печи. Разогрев металла выполняли в атмосфере воздуха. Подъем температуры проводили со скоростью 2-3 К/мин. Перед разогревом печи катетометр настраивали на указатель пружины, записывали на шкале точку отсчета и в течение нагрева контролировали изменение массы. При достижении заданного режима записывали новую точку отсчета.

Температуру измеряли платино-платинородиевой термопарой, горячий спай которой находился на уровне поверхности образца. Точность измерения температуры составляла ± 2К.Термометр помещали в чехол из оксида алюминия. Для стабильности показаний температуры холодный спай термостатировали при 273К с помощью нуль-термостата марки «Нуль-В». В качестве регистрирующего прибора температуры использовали потенциометр ПП-63. После окончания опыта систему охлаждали, тигель с содержимым взвешивали и определяли реакционную поверхность.

Погрешность эксперимента может быть рассчитана из исходной формулы константы скорости окисления (K):

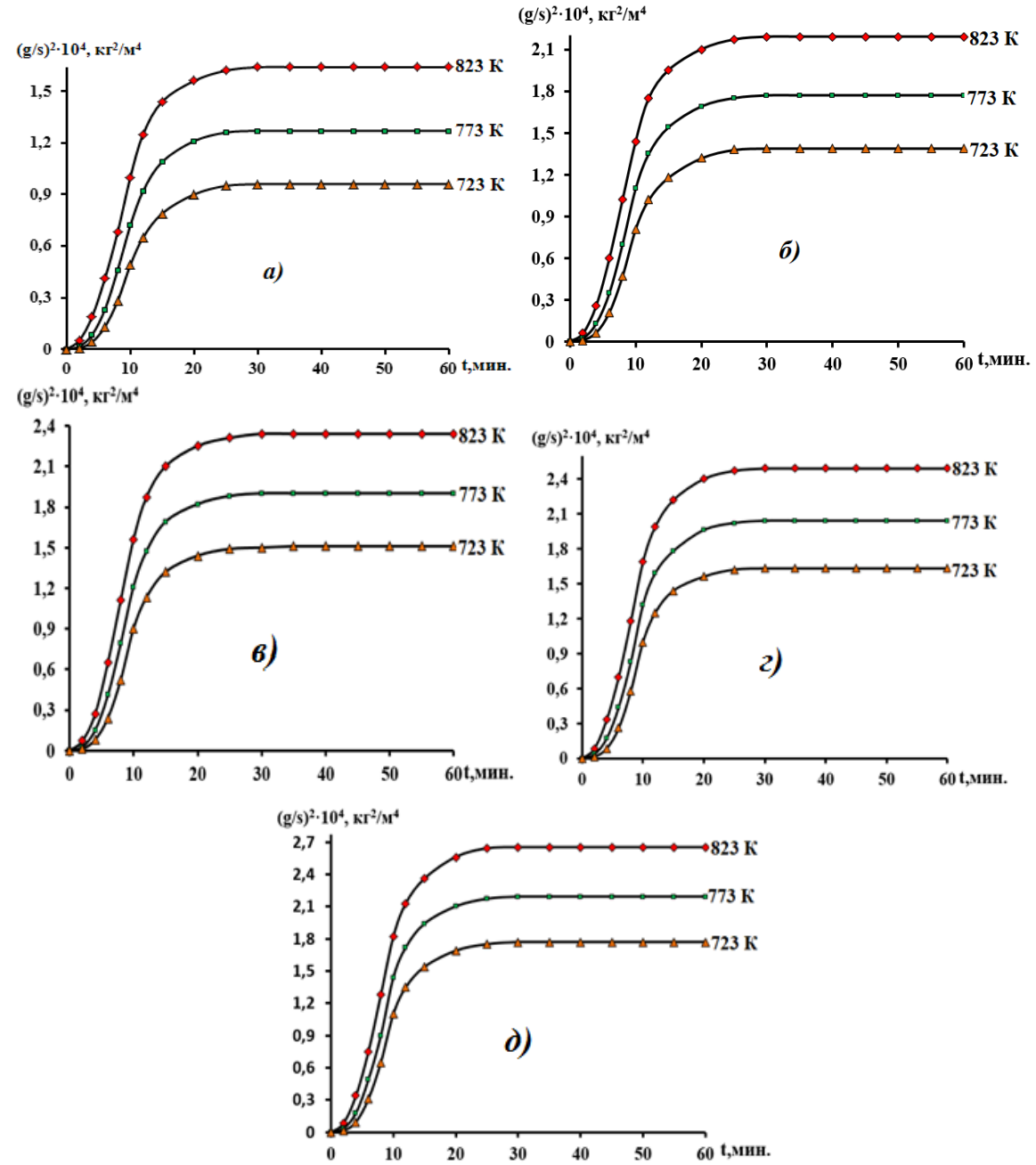


Рис. 4. Квадратичные кинетические кривые окисления алюминиевого проводникового AlV0.1 (а), содержащего кальций, мас. %: 0,01(б); 0,1(в); 0,5(г); 1.0(д)

Fig. 4. Quadratic kinetic curves of oxidation of aluminum conductor AlV0.1 (a) containing calcium, wt. %: 0.01(b); 0.1(c); 0.5(d); 1.0(e)

$$K=g/s\cdot\Delta t \quad (1)$$

где g – масса образца; s – поверхность реагирования; t – время.

Относительная ошибка складывается из суммы относительных ошибок:

$$\Delta K/K = (\Delta g/g)^2 + (\Delta s/s)^2 + \Delta t/t. \quad (2)$$

$$\Delta K/K = (2.71)^2 + (1.5)^2 + 0.027 = 9.62\%.$$

Результаты эксперимента и их обсуждение

Защита металлов и сплавов от окисления в современных условиях производства имеет важное значение, так как именно она определяет величину угара, степень загрязнения оксидными включениями, качество поверхности и другие характеристики. Изучение процессов окисления сплавов необходимо также для рационального применения раскислителей и комплексных лигатур.

Изучение высокотемпературного окисления твердых образцов сплавов проводилось в атмосферном воздухе при постоянном контроле изменения в исследуемых образцах их удельных масс. Образование оксидных пленок на поверхностях образцов происходило при постоянных температурах, равных 723, 773 и 823 К. Для окислительных процессов далее рассчитывали значения истинных скоростей окисления согласно выражению (1) графическим методом, для этого проводили касательные к полученным кинетическим кривым от начала координат. Также для высокотемпературного окисления вычисляли значения кажущейся энергии активации по тангенсу угла из выражения (3).

$$lgK=f(1/T) \quad (3)$$

Исследования проводили с образца алюминиевого проводникового сплава AlV0.1 *(Al+0.1 мас. % V)* (Рис. 2).

Кинетика окисления алюминиевого проводникового сплава AlV0.1, легированного кальцием, исследовалась в твердом состоянии термогравиметрическим методом. Сплавы для эксперимента были получены в печи сопротивления прямым сплавлением компонентов.

Исследования проводились в атмосфере воздуха при температурах 723 К, 773 К и 823 К. Кинетические и энергетические параметры процесса окисления сплава AlV0.1 с кальцием приведены в Таблице 1.

Расчеты кажущейся энергии активации показали, что добавка кальция (до 1,0 мас. %) приводит к увеличению скорости окисления исходного сплава, что сопровождается снижением величины кажущейся энергии активации процесса – с 150,0 до 134.1 кДж/моль (см. Таблицу 1).

На Рис. 3 представлены кинетические кривые окисления алюминиевого проводникового сплава AlV0.1 с кальцием.

Квадратичные кинетические кривые процесса окисления алюминиевого проводникового AlV0.1 с кальцием имеют не прямолинейный вид, что свидетельствует о не параболическом характере процесса окисления сплавов (Рис. 4).

Таблица 2. Математические модели квадратических и кинетических кривых окисления алюминиевого проводникового AlV0.1 с кальцием в твердом состоянии
Table 2. Mathematical models of quadratic and kinetic oxidation curves of aluminum conductor AlV0.1 with calcium in the solid state

Содержание кальция в сплаве, мас. %	Температура окисления, К	Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления сплавов	Коэффициент регрессии R^2
0.0	723	$y = -0{,}7\cdot10^{-8}x^4+0{,}3\cdot10^{-3}x^3-2{,}58\cdot10^{-2}x^2+0{,}9788x$	0,978
	773	$y = -0{,}6\cdot10^{-2}x^4+0{,}7\cdot10^{-3}x^3-4{,}1\cdot10^{-2}x^2+1{,}2414x$	0,984
	823	$y = -0{,}5\cdot10^{-5}x^4+0{,}2\cdot10^{-3}x^3-5{,}7\cdot10^{-2}x^2+1{,}5508x$	0,994
0.01	723	$y = -0{,}6\cdot10^{-2}x^4+0{,}5\cdot10^{-3}x^3-3{,}73\cdot10^{-2}x^2+1{,}1414x$	0,976
	773	$y = -0{,}6\cdot10^{-5}x^4+0{,}8\cdot10^{-3}x^3-5{,}25\cdot10^{-2}x^2+1{,}4175x$	0,984
	823	$y = -0{,}6\cdot10^{-8}x^4+1{,}3\cdot10^{-3}x^3-7{,}27\cdot10^{-2}x^2+1{,}7535x$	0,993
0.1	723	$y = -0{,}6\cdot10^{-3}x^4+0{,}6\cdot10^{-3}x^3-4{,}12\cdot10^{-2}x^2+1{,}2196x$	0,976
	773	$y = -0{,}6\cdot10^{-5}x^4+0{,}9\cdot10^{-3}x^3-5{,}71\cdot10^{-2}x^2+1{,}5043x$	0,985
	823	$y = -0{,}6\cdot10^{-8}x^4+1{,}3\cdot10^{-3}x^3-7{,}62\cdot10^{-2}x^2+1{,}8247x$	0,993
0.5	723	$y = -0{,}6\cdot10^{-3}x^4+0{,}6\cdot10^{-3}x^3-4{,}4\cdot10^{-2}x^2+1{,}2854x$	0,975
	773	$y = -0{,}6\cdot10^{-6}x^4+1\cdot10^{-3}x^3-6{,}01\cdot10^{-2}x^2+1{,}5684x$	0,986
	823	$y = -0{,}6\cdot10^{-9}x^4+1{,}4\cdot10^{-3}x^3-8{,}02\cdot10^{-2}x^2+1{,}9024x$	0,994
1.0	723	$y = -0{,}6\cdot10^{-3}x^4+0{,}7\cdot10^{-3}x^3-4{,}75\cdot10^{-2}x^2+1{,}3579x$	0,976
	773	$y = -0{,}6\cdot10^{-6}x^4+1\cdot10^{-3}x^3-6{,}34\cdot10^{-2}x^2+1{,}6409x$	0,987
	823	$y = -0{,}6\cdot10^{-9}x^4+1{,}5\cdot10^{-3}x^3-8{,}32\cdot10^{-2}x^2+1{,}9695x$	0,994

Изохроны окисления алюминиевого проводникового сплава AlV0.1, легированного

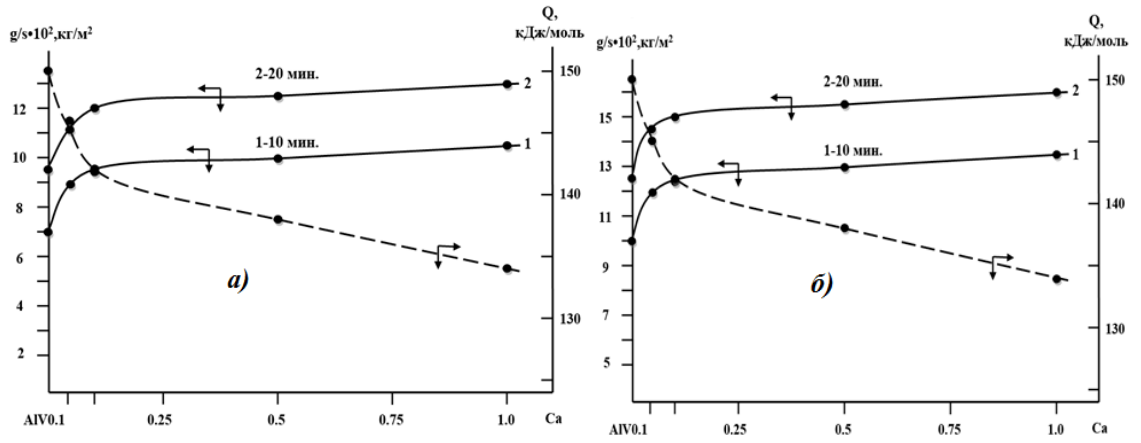


Рис. 5. Изохроны окисления алюминиевого проводникового AlV0.1 с кальцием при 723 K (а) и 823 K (б)

Fig. 5. Oxidation isochrons of aluminum conductor AlV0.1 with calcium at 723 K (a) and 823 K (b)

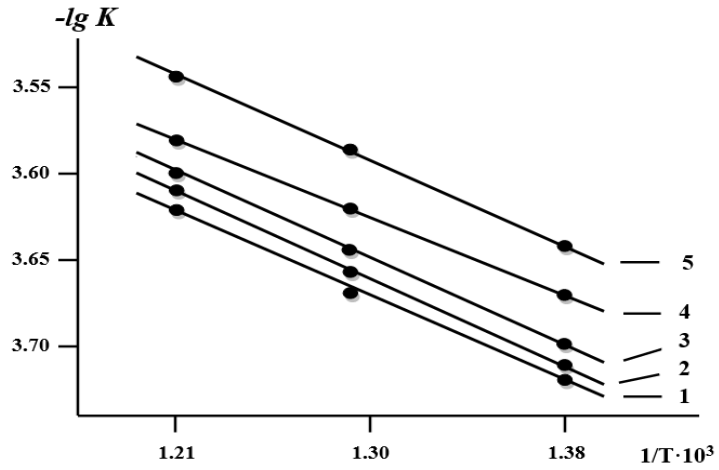
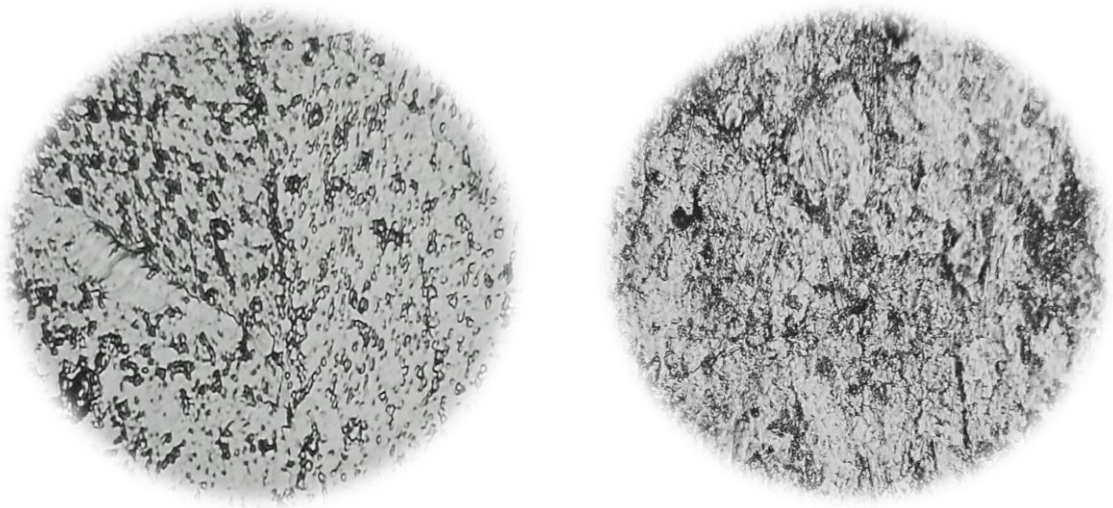


Рис. 6. Зависимость $-lgK = f(1/T)$ для алюминиевого проводникового AlV0.1 с кальцием (1), мас. %: 0,01(2); 0,05(3); 0,1(4); 0,5(5)

Fig. 6. Dependence -lgK=f(1/T) for aluminum conductor AlV0.1 with calcium (1), wt. %: 0,01(2); 0,05(3); 0,1(4); 0,5(5)



а) *б)*

Рис. 7. Микроструктуры (x500) алюминиевого проводникового AlV0.1 (а), содержащего кальция 1.0 мас. % (б)

Fig. 7. Microstructures (x500) of aluminum conductor AlV0.1 (a) containing 1.0 wt % calcium (b)

кальцием, приведены на Рис. 5. Установлено, что с увеличением концентрации кальция в сплаве AlV0.1 скорость окисления возрастает как при 10-минутной выдержке образцов в окислительной атмосфере (кривая 1), так и при 20-минутной выдержке (кривая 2). Это подтверждается снижением величины кажущейся энергии активации процесса окисления по мере роста содержания кальция в сплаве.

На Рис. 6 изображена зависимость $-\lg K = f(1/T)$ для алюминиевого проводникового AlV0.1, содержащего 0,01 – 1.0 мас. % кальция (прямолинейный характер). По тангенсу угла наклона данных прямых были определены величины кажущейся энергии активации процесса окислении сплавов.

Микроструктуры исследуемых сплавов были изучены с использованием микроскопа «KP-L3230-2K». В качестве примера на Рис. 7 представлены микроструктуры образцов до и после легирования кальцием сплава AlV0.1. Установлено, что введение кальция, особенно в количестве 1,0 мас. %, приводит к заметному измельчению структурных составляющих исходного алюминиевого проводникового сплава AlV0.1.

По результатам рентгенофазового анализа продуктов окислений алюминиевого проводникового AlV0.1 с кальцием (Рис. 8) установлено, что при окислениях сплавов образуются следующие оксиды: Al_2O_3; Al_2O; VO_{532}; VO_2 (а), CaO; VO_2 (б).

Исследования влияния кальция на окисляемость алюминиевого проводникового сплава AlV0.1 показали, что легирующая

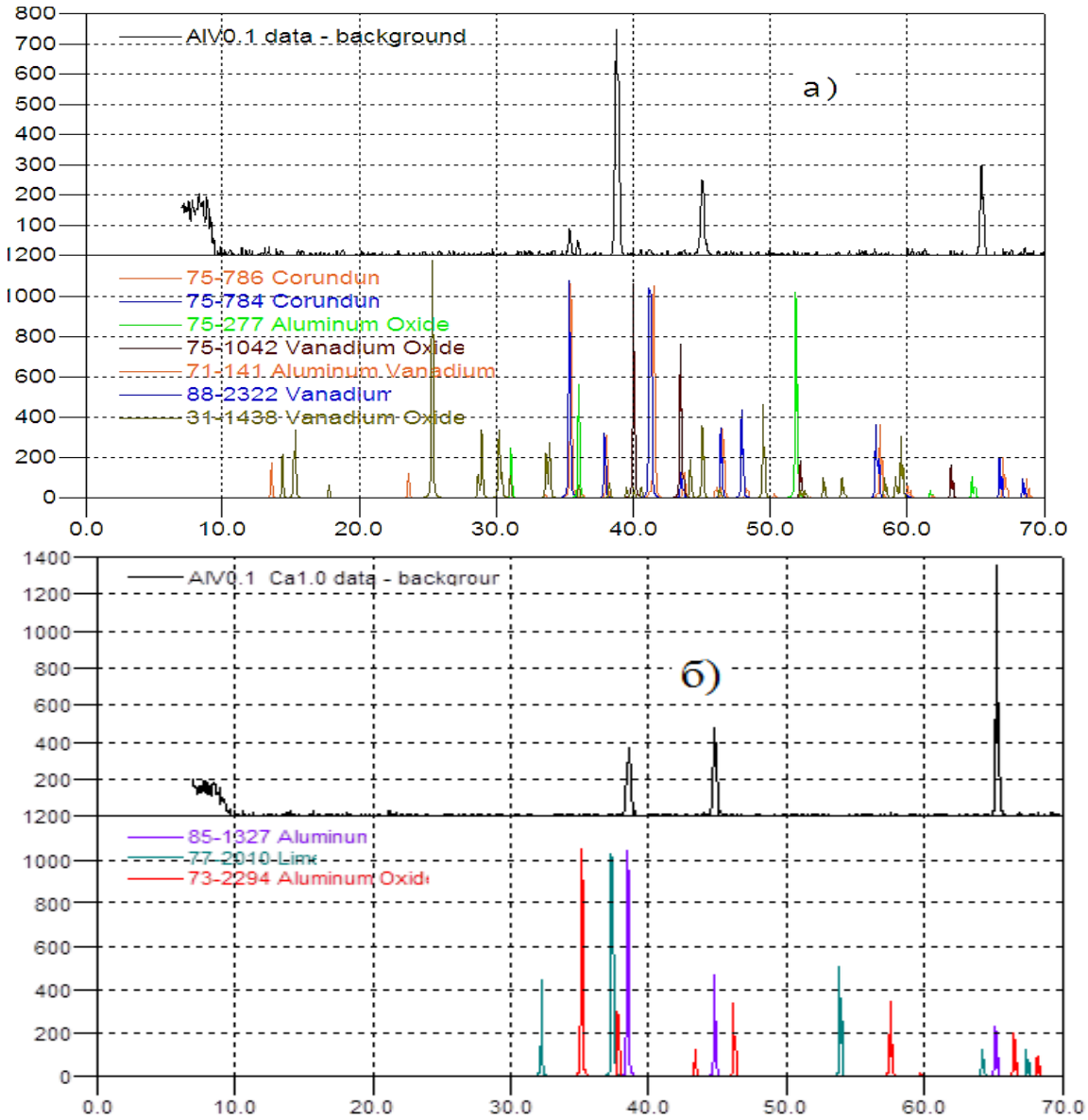


Рис. 8. Дифрактограммы продуктов окисления алюминиевого проводникового AlV0.1 (а) с 1.0 мас. % кальцием (б)

Fig. 8. Diffractograms of oxidation products of aluminum conductor AlV0.1 (a) with 1.0 wt. % calcium (b)

добавка кальция до 1,0 мас. % усиливает процесс окисления по механизму образования многокомпонентных оксидов типа шпинелей, которые не обладают достаточными защитными свойствами. В то же время введение небольших концентраций кальция в сплав AlV0.1 вызывает лишь незначительное увеличение скорости окисления, что позволяет считать такие соотношения целесообразными для эксплуатации изделий из данного материала при относительно невысоких температурах.

Выводы

1. Методом термогравиметрии исследована зависимость скорости окисления алюминиевого проводникового сплава AlV0.1 от содержания кальция и температуры.
2. Установлено, что скорость окисления сплава AlV0.1 возрастает с увеличением температуры и концентрации кальция.
3. На основе полученных полиномов квадратичных кинетических кривых показано, что процесс сплавов окисления протекает по гиперболическому механизму.
4. Добавки кальция до 1,0 мас. % способствуют значительному измельчению структурных составляющих исходного алюминиевого проводникового сплава AlV0.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В. М. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Учебное пособие. Часть 1 // Материаловедение, Архангельск : Северный (Арктический) Федеральный университет, 2015. 327 с.
2. Лужникова Л. П. Материалы в машиностроении. Т. 1. Цветные металлы и сплавы. М., 1967. 287 с.
3. Кубашевский О. Я., Гопкинс Б. Э. Окисление металлов и сплавов // Перевод с англ. Алексеева В. А. 2-е изд. М. : Металлургия, 1965. 428 с.
4. Зиновьев В. Е. Кинетические свойства металлов при высоких температурах: справочник. М. : Металлургия, 1984. 200 с.
5. Лепинских Б. М., Кисилев В. Об окислении жидких металлов и сплавов кислородом из газовой фазы // Изв. АН СССР. Металлы. 1974. № 5. С. 51–54.
6. Талашманова Ю. С. Окисление жидких сплавов на основе кремния, германия, олова и свинца. Красноярск, 2007. 130 с.
7. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. Пер. с англ. М. : Металлургия, 1979. 640 с.
8. Зокиров Ф. Ш., Ганиев И. Н., Ходжаназаров Х. М., Рахматуллоева Г. М. Кинетика окисления алюминиевого проводникового сплава ALTI0,1 С литием в твердом состоянии // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2025. Т. 73. № 3. С. 35–42. DOI: 10.46418/0021-3489_2025_73_03_07.
9. Дунаев Ю. Д. Нерастворимые аноды на основе свинца. Алма-Ата : «Наука КазССР», 1978. 316 с.
10. Окилов Ш. Ш., Ганиев И. Н., Джайлоев Дж. Х., Муллоева Н. М. Кинетика окисления сплава свинца с сурьмой ССУ3, модифицированного литием, в твердом состоянии // Журнал физической химии. 2024. Т. 98. № 3. С. 62–68. DOI: 10.31857/S0044453724030074.
11. Ходжаназаров Х. М., Ганиев И. Н., Саидов Ш. Х. Исследование окисления свинцового баббита Б(PBSB15SN10) с таллием, в твердом состоянии // Расплавы. 2026. № 1. С. 46–61. DOI: 10.7868/S3034571526010048.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Об авто*рах:

Ганиев Изатулло Наврузович – Институт химии им. В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана (734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2), доктор химических наук, академик НАНТ, профессор, заведующий лабораторией, специалист в области материаловедения и металлургии, e-mail: ganievizatullo48@gmail.com

Ашуров Кобилджон Хакимович – Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими (734042, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10), соискатель кафедры «Материаловедение, металлургические машины и оборудование», специалист по материаловедению

Окилов Шахром Шукурбоевич – Институт химии им. В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана (734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, специалист в области металлургии, e-mail: Okilov70070@mail.ru

Ганиева Наргис Изатуллоевна – Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими (734042, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10), доцент кафедры «Материаловедение, металлургические машины и оборудование», специалист в области металлургии.

Заявленный вклад авторов:
Ганиев Изатулло Наврузович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, выводы, написание текста, научный менеджмент, сбор и теоретический анализ данных, обзор соответствующей литературы, экспериментальные исследования, обработка и анализ их результатов.
Ашуров Кобилджон Хакимович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, выводы, написание текста, научный менеджмент, сбор и теоретический анализ данных, обзор соответствующей литературы, экспериментальные исследования, обработка и анализ их результатов.
Окилов Шахром Шукурбоевич – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, выводы, написание текста, научный менеджмент, сбор и теоретический анализ данных, обзор соответствующей литературы, экспериментальные исследования, обработка и анализ их результатов.
Ганиева Наргис Изатуллоевна – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, выводы, написание текста, научный менеджмент, сбор и теоретический анализ данных, обзор соответствующей литературы, экспериментальные исследования, обработка и анализ их результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

KINETICS OF OXIDATION OF CALCIUM-DOPED ALUMINUM CONDUCTOR ALLOY AlV0.1 IN THE SOLID STATE

Izatullo N. Ganiev[1], Qobiljon H. Ashurov[2], Shahrom Sh. Okilov[1], Nargis I. Ganieva [2]

[1] V.I. Nikitin Institute of Chemistry
[2]Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi

* for correspondence: ganiev48@mail.ru

Abstract.
The oxidation of aluminum conductor AlV0.1 with calcium plays a dual role in technology: on the one hand, it provides natural protection for the metal by forming a strong oxide film, but on the other hand, it can reduce the performance of products when the film is destroyed in aggressive environments. The paper presents the results of a study of the oxidation kinetics of the aluminum conductor alloy AlV0.1, doped with calcium, performed by the thermogravimetric method. It was found that the introduction of calcium in an amount of 0.01 to 1.0 wt. % leads to an increase in the oxidation rate of the initial alloy AlV0.1, accompanied by a decrease in the apparent activation energy of the process. It has been shown that the oxidation process of alloys in the studied temperature interval of 723, 773, and 823K follows the hyperbolic dependence $y = kx^n$, where n = 1 – 4. The analysis of quadratic oxidation kinetic curves, constructed in the form of dependencies of specific weight gain of alloys on time, allowed to reveal the hyperbolic mechanism of the oxidation process. By the method of X-ray phase analysis, the phase composition of oxidation products of the aluminium conductor alloy AlV0.1, doped with calcium, was determined, and their role in the oxidation mechanism was established. The results of X-ray diffraction showed that the following oxide compounds are formed during oxidation of the AlV0.1 alloy containing calcium: Al_2O_3; Al_2O; VO_{532}; VO_2, CaO; VO_2. It has been established that additives of up to 1.0 wt. % of calcium as structure modifiers significantly refine the microstructure of the initial AlV0.1 alloy, making it uniform and fine-grained. As a result of the conducted research, it has been established that the structure of the studied alloys is of the same type and consists of an aluminum solid solution and other phases. According to the state diagram of the Al-V system, the alloy structure consists of the following phase components: primary Al10V crystals on the background of an aluminum solid solution phase, an eutectic (or partially peritectic) mixture of AlV0.1 crystals with α(Al).

Article info
Received:
28 March 2026

Accepted for publication:
01 September 2026

Accepted:
15 September 2026

Keywords: *aluminum conductor AlV0.1, calcium, thermogravimetric method, oxidation kinetics, true oxidation rate, apparent activation energy, and microstructure*

For citation: Ganiev I.N., Ashurov Q.H., Okilov Sh.Sh., Ganieva N.I. Kinetics of oxidation of calcium-doped aluminum conductor alloy AlV0.1 in the solid state. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 4(176):107-117. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-4-107-117, EDN: RSOGRJ

REFERENCES

1. Alexandrov V.M. Materials science and technology of structural materials. The training manual. Part 1. Materials Science. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University; 2015. 327 p.

2. Luzhnikova L.P. Materials in mechanical engineering. Vol. 1. Non-ferrous metals and alloys. M., 1967. 287 p.

3. Kubashevsky O.Ya., Hopkins B.E. Oxidation of metals and alloys. Translated from English by V.A. Alekseev. 2nd ed. M.: Metallurgy; 1965. 428 p.

4. Zinoviev V.E. Kinetic properties of metals at high temperatures. Handbook. M.: Metallurgy; 1984. 200 p.

5. Lepinskikh B.M., Kisilev V. On the oxidation of liquid metals and alloys by oxygen from the gas phase. *Izv. AN SSSR. Metals.* 1974; 5:51-54.

6. Talashmanova Yu.S. Oxidation of liquid alloys based on silicon, germanium, tin and lead. Krasnoyarsk, 2007. 130 p.

7. Mondolfo L.F. Structure and properties of aluminum alloys. Translated from English. M.: Metallurgy; 1979. 640 p.

8. Zokirov F.Sh., Ganiev I.N., Khodzhanazarov H.M., Rakhmatulloeva G.M. Kinetics of oxidation of aluminum conductor alloy ALTI0.1 with lithium in the solid state. *News of higher educational institutions. Technology of light industry.* 2025; 73(3):35-42. DOI: 10.46418/0021-3489_2025_73_03_07.

9. Dunaev Yu.D. Insoluble anodes based on lead. Alma Ata: Nauka KazSSR; 1978. 316 p.

10. Okilov Sh.Sh., Ganiev I.N., Dzhayloev J.H., Mulloeva N.M. Kinetics of oxidation of lithium-modified lead-antimony alloy CCU3 in the solid state. *Journal of Physical Chemistry.* 2024; 98(3):62-68. DOI: 10.31857/S0044453724030074.

11. Khodzhanazarov Kh.M., Ganiev I.N., Saidov Sh.K. Investigation of the oxidation of lead babbit B(PBSB15SN10) with thallium in the solid state. *Melts.* 2026; 1:46-61. DOI: 10.7868/S3034571526010048.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Izatullo N. Ganiev – V.I. Nikitin Institute of Chemistry, National Academy of Sciences of Tajikistan (299/2 Ayni Street, Dushanbe, 734063, Republic of Tajikistan), Doctor of Chemical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Professor, Head of Laboratory, specialist in materials science and metallurgy, e-mail: ganievizatullo48@gmail.com

Qobiljon H. Ashurov — Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi (10 Rajabov Academicians Avenue, Dushanbe, 734042, Republic of Tajikistan), applicant at the Department of "Materials Science, Metallurgical Machines and Equipment," specialist in materials science

Shahrom Sh. Okilov — V.I. Nikitin Institute of Chemistry, National Academy of Sciences of Tajikistan (299/2 Ayni Street, Dushanbe, 734063, Republic of Tajikistan), Senior Researcher, specialist in metallurgy, e-mail: Okilov70070@mail.ru

Nargis I. Ganieva — Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi (10 Rajabov Academicians Avenue, Dushanbe, 734042, Republic of Tajikistan), Associate Professor of the Department of "Materials Science, Metallurgical Machines and Equipment," specialist in metallurgy

Contribution of the authors:

Izatullo N. Ganiev – research problem statement; conceptualisation of research; drawing the conclusions; writing the text, research problem statement; scientific management; data collection; data analysis, reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; data analysis; drawing the conclusions.

Qobiljon H. Ashurov – formulation of the research problem, conceptualization of the study, conclusions, writing the text, scientific management, collection and theoretical analysis of data, review of relevant literature, experimental studies, processing and analysis of their results.

Shahrom Sh. Okilov – formulation of the research problem, conceptualization of the study, conclusions, writing the text, scientific management, collection and theoretical analysis of data, review of relevant literature, experimental studies, processing and analysis of their results.

Nargis I. Ganieva – formulation of the research problem, conceptualization of the study, conclusions, writing the text, scientific management, collection and theoretical analysis of data, review of relevant literature, experimental studies, processing and analysis of their results.

All authors have read and approved the final manuscript.