

Научная статья

УДК 669.45.018.8.24/884

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-90-100

КИНЕТИКА ОКИСЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА $AlFe_5Si_{10}$, МОДИФИЦИРОВАННОГО СВИНЦОМ

Якубов Умарали Шералиевич¹, Ганиев Изатулло Наврузович¹,
Сафаров Амиршо Гоибович²

¹ Институт химии им. В. И. Никитина НАН Таджикистана² Физико-технический институт им. С. У. Умарова НАН Таджикистана

* e-mail: yakubovumarali@gmail.com

**Информация о статье**

Поступила:

05 ноября 2025 г.

Одобрена после
рецензирования:

15 мая 2026 г.

Принята к публикации:

11 июня 2026 г.

Опубликована:

29 июня 2026 г.

Ключевые слова:

алюминиевый сплав $AlFe_5Si_{10}$
свинца,
термогравиметрический
метод, кинетика окисления,
истинная скорость окисления,
кажущаяся энергия активации

Аннотация.

Известно, что технический алюминий с повышенным содержанием железа, кремния и других примесей из-за низких эксплуатационных характеристик не может найти применение в промышленности, поэтому разработка новых составов сплавов на основе такого металла является весьма актуальной задачей. Одними из перспективных составов сплавов на диаграмме алюминий-железа являются эвтектика ($\alpha-Al + Al_3Fe$) и эвтектические составы, которые, имея минимальный интервал кристаллизации, содержат железа до 5 мас. %. Сплав данного состава был дополнительно легирован 10 мас. % кремнием и подвергался модифицированию свинцом. Цель работы заключается в установлении влияния свинца как модификатора на кинетику высокотемпературного процесса окисления алюминиевого сплава $AlFe_5Si_{10}$ в твердом состоянии. Для достижения поставленной цели были рассмотрены результаты исследования кинетики окисления модифицированного свинцом алюминиевого сплава $AlFe_5Si_{10}$ ($Al + 5\% Fe + 10\% Si$) в твердом состоянии. Эксперименты проводились термогравиметрическим методом на воздухе при атмосферном давлении в интервале температур 773-873 К. Установлено, что процесс окисления во всем исследованном диапазоне температур с высокой точностью описывается полиномом четвертой степени. В ходе экспериментов отмечено периодическое изменение скорости окисления во времени. Определены кинетические и энергетические параметры процесса окисления сплавов. Установлено, что при температурах 773, 823 и 873 К добавки свинца в концентрации до 1,0 мас. % уменьшают окисляемость алюминиевого сплава $AlFe_5Si_{10}$, при этом значение эффективной энергии активации увеличивается. Скорости окисления сплавов при исследованных температурах имеют порядок 10^{-4} кг·м⁻²·сек⁻¹. Для изучения состава продуктов окисления образцов сплавов $AlFe_5Si_{10}$ в зависимости от содержания в них свинца использован метод рентгенофазового анализа. Показано, что продуктами окисления сплавов являются: Al_2O_3 ; $Al_{4.3}FeSi$; $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$; $Si_{11.96}Al_{0.04}O_{24}$; $AlFeO_3$; $Pb_{32}(Pb_4O_4)_8$ ($Al_{92}Si_{100}O_{384}$); PbO ; $Pb_2O_{3.333}$; Pb_3O_4 .

Для цитирования: Якубов У.Ш., Ганиев И.Н., Сафаров А.Г. Кинетика окисления алюминиевого сплава $AlFe_5Si_{10}$, модифицированного свинцом // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 2 (174). С. 90-100. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-90-100, EDN: REYTCO

Введение

Алюминиевые сплавы как конструкционный материал в последнее время заняли значительную позицию вместо стальных конструкций. С учетом подробного исследования и анализа диаграмм состояния металлических систем были разработаны легкие сплавы на основе алюминия в качестве конструкционного материала, эквивалентные стальным или превосходящие их, например, сплавы алюминия

с добавками цинка, магния, меди и ряда других металлов [1–3].

Анализ литературы показывает, что алюминий низкой степени чистоты с повышенным содержанием железа почти не находит использования, кроме как для раскисления и дегазации стали. Также перспективным является разработка алюминиевых сплавов на основе технического

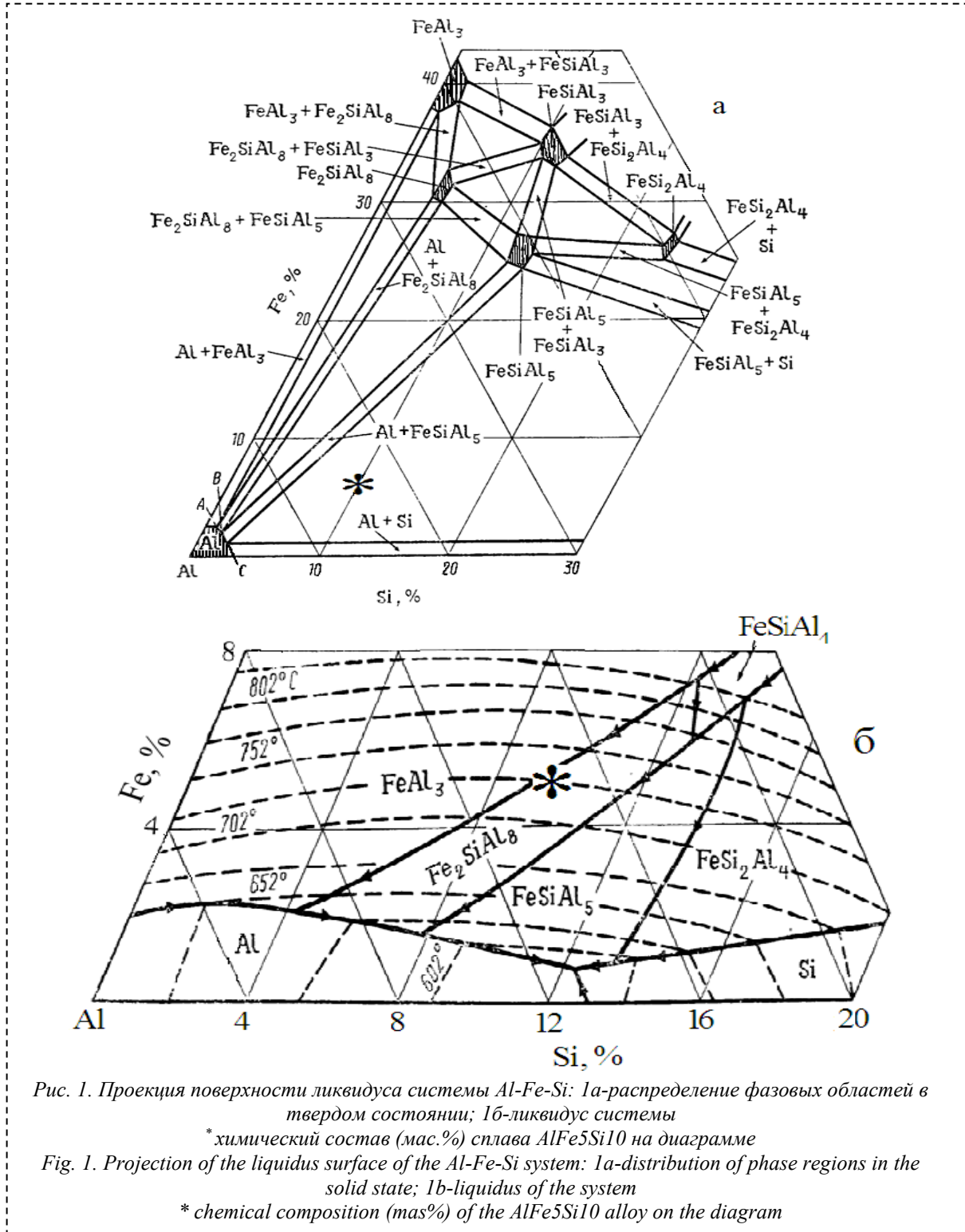


Рис. 1. Проекция поверхности ликвидуса системы Al-Fe-Si: 1а-распределение фазовых областей в твердом состоянии; 1б-ликвидус системы

* химический состав (мас.%) сплава AlFe5Si10 на диаграмме

Fig. 1. Projection of the liquidus surface of the Al-Fe-Si system: 1a-distribution of phase regions in the solid state; 1b-liquidus of the system

* chemical composition (mas%) of the AlFe5Si10 alloy on the diagram

алюминия с повышенным содержанием железа. Кроме того, сплавы алюминия с железом и оловом, свинцом и висмутом широко применяют в качестве носителя электрического заряда в электротехнике [4–6].

Повышенное содержание примесей, таких как кремний и железо в алюминии и алюминиевых сплавах, является главным преткновением к их широкому применению в различных областях производства. Фазы с алюминием, которые образуются из примесей кремния и железа, в итоге создают внутренние дефекты структурной неоднородности, что оказывает отрицательное влияние на качество продукции. Следовательно, затратным являются очистки из железа алюминия [7–9].

Из диаграммы состояния системы Al-Fe-Si вытекает, что в равновесии с алюминиевым твердым раствором в данной системе находятся две тройные фазы Fe_2SiAl_8 (α) и $FeSiAl_5$ (β). Третья фаза $FeSi_2Al_4$ (γ) в сплавах, богатых кремнием и фаза $FeSiAl_3$ (δ), выделяется при кристаллизации сплавов с высоким содержанием железа и кремния [1]. С алюминиевым твердым раствором в системе Al-Fe-Si в равновесии находятся тройные фазы Fe_2SiAl_8 (α) и $FeSiAl_5$ (β) (Рис. 1а). Сплав АЖ5К10, согласно химическому составу, располагается в тройной области α -Al+Si+ $FeSiAl_5$. Установлено, что фаза $FeSiAl_5$ (25,61%Fe и 12,82%Si) при кристаллизации выделяется в виде иероглифов или в виде пластин. Гомогенная область для указанной фазы находится в пределах 25,1-30,1%Fe и 12,2-15,1%Si. Интерметаллид $FeSiAl_5$ имеет моноклинную решетку с параметрами $a=b=0,612$ нм и $c=0,415$ нм; $\alpha=91^\circ$; $\delta=3,3\div 3,35$ г/см³ и HV 5800 мПа/м² [1].

Ликвидус системы Al-Fe-Si при высоких содержаниях алюминия представлен на Рис. 1б согласно работе [1]. В области до 6,1%Fe и 12,2%Si в системе имеет место пять областей первичной кристаллизации: α -твердый раствор на основе алюминия, $FeAl_3$, тройные фазы Fe_2SiAl_8 , $FeSiAl_5$. Судя по проекции поверхности ликвидуса алюминиевого угла системы Al-Fe-Si (Рис. 1б), сплав АЖ5К10 имеет температуру плавления 727^oC по [10] и 670^oC по [1]. Это соответствует области первичной кристаллизации фазы Fe_2SiAl_8 . В системе протекает две перитектические реакции при 630^oC по реакции $Ж+FeAl_3=\alpha-Al+Fe_2SiAl_8$, а при 612^oC происходит реакция $Ж+Fe_2SiAl_8=\alpha-Al+FeSiAl_5$. Кристаллизация сплава АЖ5К10 завершается в точке тройной эвтектики по реакции $Ж=\alpha-Al+Si+FeSiAl_5$ при 576^oC.

Таким образом, цель работы заключалась в разработке новых сплавов на основе низкосортного алюминия с тем, чтобы превратить данный металл в сплав, который

отличался бы особыми свойствами и мог применяться в промышленности.

Для реализации поставленной цели в качестве объекта исследования кинетики высокотемпературного процесса окисления был выбран алюминиевый сплав эвтектического состава AlFe5Si10, который подвергался легированию свинцом в количестве от 0.01 до 1.0 мас. %.

Материалы и методика исследования

Сплавы для исследований кинетики окисления получали в шахтной печи сопротивления типа СШОЛ. Для этого использовали алюминий с повышенным содержанием железа (5 мас. %). Данный металл извлекался непосредственно одной из ванн алюминиевой компании ГУП «ТалКо». Затем в данный расплав при температуре 750-800^oC вводился кремний кристаллический КР00 (ГОСТ 2169-69) из расчета 10 мас. %. В результате получался сплав марки AlFe5Si10. Расплав дегазировался таблетками «дегайзера», затем удалялся шлак. После этого данный сплав подвергался легированию металлическим свинцом марки С2 (ГОСТ 3778-98). Содержание свинца в исходном сплаве составляло 0.05; 0.1; 0.5; 1.0 мас. %.

Для изучения кинетики окисления алюминиевого сплава AlFe5Si10, модифицированного свинцом в изотермических условиях, использовали термогравиметрический метод, основанный на непрерывном взвешивании образцов сплавов в твердом состоянии. Погрешность методики исследования кинетики окисления сплавов приведена в работах [11, 12].

Схема установки для исследования кинетики окисления сплавов приведена на Рис. 2. Основные части 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 массы 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 К, 773 К и 823 К [13–15].

Тигель с исследуемым образцом помещали в изотермическую зону печи. Разогрев металла выполняли в атмосфере воздуха. Подъем температуры проводили со скоростью 2-3⁰С/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):

$$K = \frac{g/s}{t}, \quad (1)$$

где: g – масса образца; s – поверхность реагирующая; t – время.

Относительная ошибка в оценке складывается из суммы относительных ошибок:

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

Рассмотрим каждое слагаемое в отдельности. Точность взвешивания определяли по формуле:

$$\frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta G}{9,0} \cdot 100 + \frac{0,0001_{ТВ}}{9,0} \cdot 100 + \frac{0,0001_{ТВ}}{100} + \Delta L. \quad (3)$$

Величина 0.0001_{ТВ} – числитель второго и третьего слагаемого, представляет ошибку при взвешивании образца до и после опыта на аналитических весах, Δg – точность взвешивания пружинных весов в процессе эксперимента или их чувствительность, определяемая путем калибровки весов вместе с подвеской, платиновой нитью и тиглем с навеской. Одновременно весы проверяли на постоянство модуля упругости пружин (число витков W = 20).

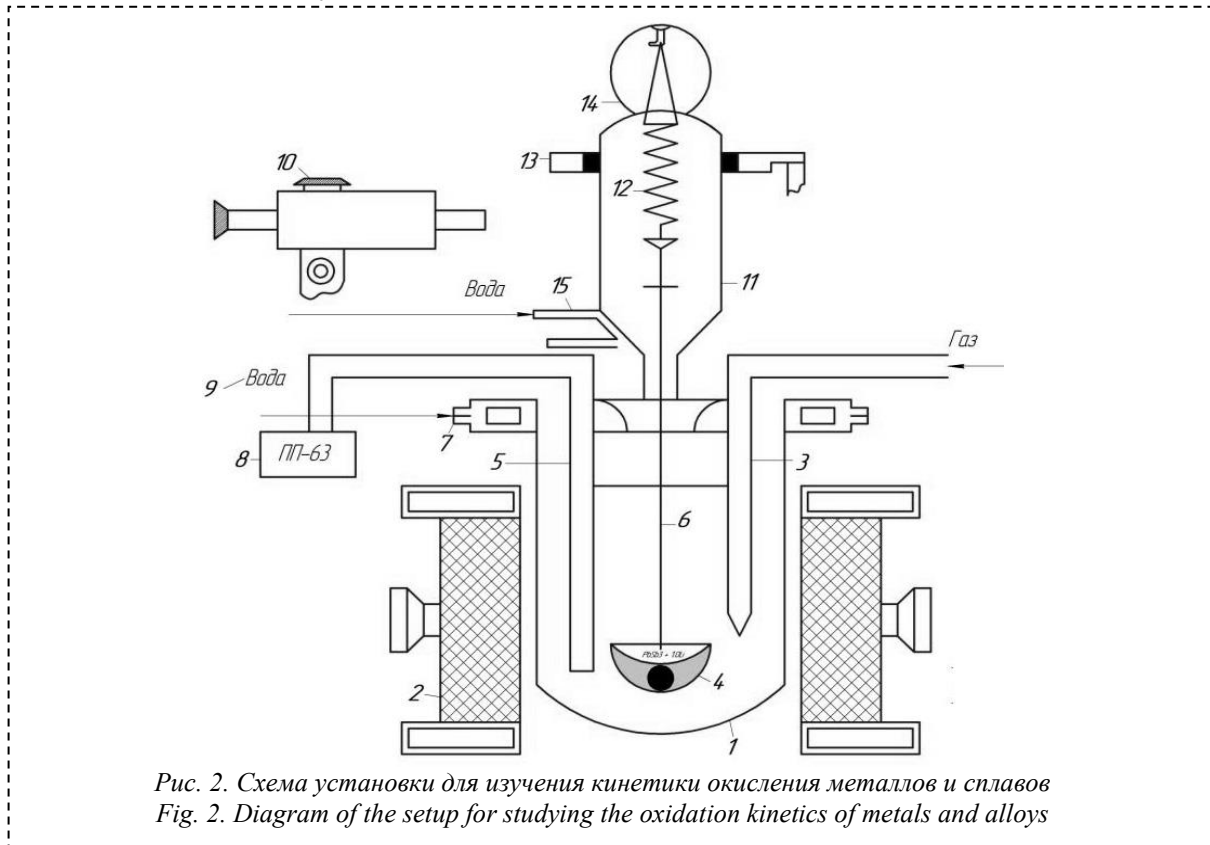
Схема калибровки:

$$\begin{cases} m + a \\ m + a + k\Delta h \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} m + 3a \\ m + 3a - k\Delta h \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} m + na \\ m + na - k\Delta h, \end{cases} \quad (6)$$

где: m – масса всей системы; k – постоянная добавка (0.020·10⁻³ кг); Δh – увеличение длины пружины, которая фиксируется с помощью катетометра КМ-8 с ценой деления 0.10·10⁻³ м. Отсчет производили по перемещению указателя, укрепленного на нижнем конце пружины. Чувствительность (ΔG) отградуированных весов по приведенной схеме для нагрузок до 15·10⁻³ кг



составила $0.0001 \cdot 10^{-3}$ кг; ΔL – ошибка, учитывающая испарение металла в процессе эксперимента. Для каждого металла она имеет свою величину и оценивалась следующим образом: металл нагревался до нужной температуры и выдерживался в атмосфере очищенного от кислорода и влаги инертного газа, а затем по разности веса металла до и после нагрева определяли потерю веса (массы) металла [13, 14].

Вычисление поверхности реагирования производилось с помощью катетометра КМ-8, имеющего пределы измерения 0.0-0.5м. При точности измерений ± 0.000030 м и с учетом шероховатости погрешность составляет $\pm 1.9\%$. Следующий член $\Delta t/t$ мал по величине:

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{1}{3600} \cdot 100 = 0.027\% \quad (7)$$

и может при расчетах не учитываться.

Температура замерялась платина-платинородиевой термопарой, горячий спай которой находился на уровне поверхности образца. Точность измерения температуры принимали равной ± 2 К. Ошибка в измерениях составила при этом:

$$\Delta T/T = 2.100/900 = 0.22\% \quad (8)$$

Вычисленная относительная ошибка эксперимента по уравнению (2) составляет:

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

на примере исходного сплава AlFe5Si10.

Кинетические характеристики окислительного процесса алюминиевого сплава AlFe5Si10 с содержанием Al – 85%, Fe – 5%, Si – 10% при введении в него различного содержания

методом в изотермических условиях, непрерывным взвешиванием образцов.

Результаты и их обсуждение

Для исследования влияния свинца на кинетику окисления алюминиевого сплава AlFe5Si10 в твердом состоянии была синтезирована серия сплавов с содержанием свинца от 0.05 до 1.0% по массе. Исследование проводили в атмосфере воздуха при температурах 773 К, 823 К и 873 К. Результаты исследования представлены на Рис. 3–7 и в Таблицах 1, 2.

Кинетические кривые окисления алюминиевого сплава AlFe5Si10 в твердом состоянии характеризуются более растянутым процессом формирования оксидной пленки на начальном этапе окисления. Скорость окисления данного сплава в зависимости от времени и температуры увеличивается, однако рост удельной массы образца к 15 минутам приобретает постоянное значение. На Рис. 3а представлена истинная скорость окисления, вычисленная по касательным, проведенным от начала координат к кривым, и рассчитанная по формуле $K=g/s \cdot \Delta t$ для сплава AlFe5Si10, она составляет $1.42 \cdot 10^{-4}$ и $1.76 \cdot 10^{-4}$ кг·м⁻²·сек⁻¹ соответственно при температурах 773 К и 873 К. Кажущаяся энергия активации окисления, вычисленная по тангенсу угла наклона прямой зависимости $\lg K - 1/T$, составляет 178,0 кДж/моль (Таблица 1).

При температурах 773 К и 873 К значение истинной скорости окисления сплава,

Таблица 1. Кинетические и энергетические параметры процесса окисления алюминиевого сплава AlFe5Si10, модифицированного свинцом, в твердом состоянии

Table 1. Kinetic and energy parameters of the oxidation process of the lead-modified aluminum alloy AlFe5Si10 in the solid state

Добавка свинца в сплаве AlFe5Si10, мас. %	Температура окисления, К	Истинная скорость окисления $K \cdot 10^4$, кг·м ⁻² ·с ⁻¹	Кажущаяся энергия активации, кДж/моль
0.0	773	1.42	178.0
	823	1.61	
	873	1.76	
0.05	773	1.34	182.0
	823	1.54	
	873	1.69	
0.1	773	1.31	184.9
	823	1.51	
	873	1.66	
0.5	773	1.28	188.2
	823	1.48	
	873	1.63	
1.0	773	1.25	192.5
	823	1.45	
	873	1.60	

свинца исследовали термogravиметрическим содержащего 0.1 мас. % свинца, изменяется от

$1.31 \cdot 10^{-4}$ до $1.66 \cdot 10^{-4}$ $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$. Кажущаяся энергия активации при этом составляет 184.9

кДж/моль (Рис. 3б).

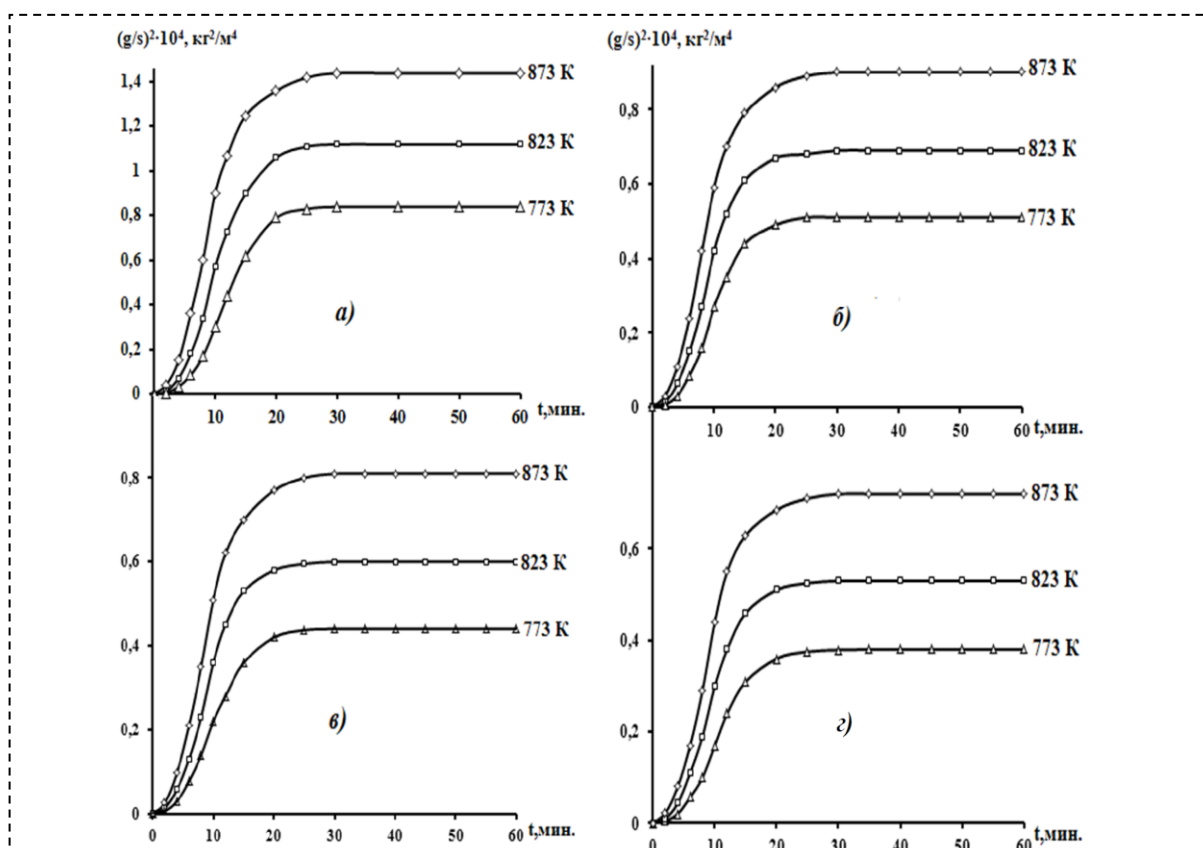


Рис. 4. Квадратичные кинетические кривые окисления алюминиевого сплава AlFe5Si10 (а), содержащего 0.1% (б), 0.5 (в) и 1.0 (г) свинца, в твердом состоянии
 Fig. 4. Quadratic kinetic curves of oxidation of the aluminum alloy AlFe5Si10 (a) containing 0.1% (b), 0.5% (c), and 1.0% (d) of lead in the solid state

Таблица 2. Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления алюминиевого сплава AlFe5Si10 со свинцом, в твердом состоянии
 Table 2. Polynomials of quadratic kinetic curves of oxidation of the AlFe5Si10 aluminum alloy with lead, in the solid state

Добавка свинца в сплаве AlFe5Si10, мас. %	Температура окисления, К	Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления сплавов	Коэффициент регрессии, R ²
0.0	773	$y^* = -0,6 \cdot 10^{-1}x^4 - 0,6 \cdot 10^{-3}x^3 - 1,24 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,6639x^{**}$	0,988
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-2}x^4 + 0,4 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,14 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,99x$	0,991
	873	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,9 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,39 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,354x$	0,996
0.05	773	$y = -0,6 \cdot 10^{-2}x^4 + 0,4 \cdot 10^{-3}x^3 - 2,81 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,7873x$	0,991
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-4}x^4 + 0,7 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,92 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,9938x$	0,993
	873	$y = -0,6 \cdot 10^{-6}x^4 + 0,9 \cdot 10^{-3}x^3 - 5,22 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,2217x$	0,996
0.1	773	$y = -0,6 \cdot 10^{-1}x^4 + 0,3 \cdot 10^{-3}x^3 - 2,24 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,6876x$	0,986
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0,6 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,46 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,9077x$	0,990
	873	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,8 \cdot 10^{-3}x^3 - 4,68 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,1254x$	0,995
0.5	773	$y = -0,6 \cdot 10^{-1}x^4 + 0,3 \cdot 10^{-3}x^3 - 2,02 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,6288x$	0,990
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-3}x^4 + 0,5 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,15 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,8391x$	0,992
	873	$y = -0,6 \cdot 10^{-5}x^4 + 0,7 \cdot 10^{-3}x^3 - 4,26 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,0434x$	0,995
1.0	773	$y = -0,7 \cdot 10^{-6}x^4 + 0,2 \cdot 10^{-3}x^3 - 1,16 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,5485x$	0,988
	823	$y = -0,6 \cdot 10^{-2}x^4 + 0,4 \cdot 10^{-3}x^3 - 2,75 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,7594x$	0,990
	873	$y = -0,6 \cdot 10^{-4}x^4 + 0,6 \cdot 10^{-3}x^3 - 3,83 \cdot 10^{-2}x^2 + 0,9618x$	0,994

y^* – удельный привес образцов (g/s);

x^{**} – продолжительность окисления образцов.

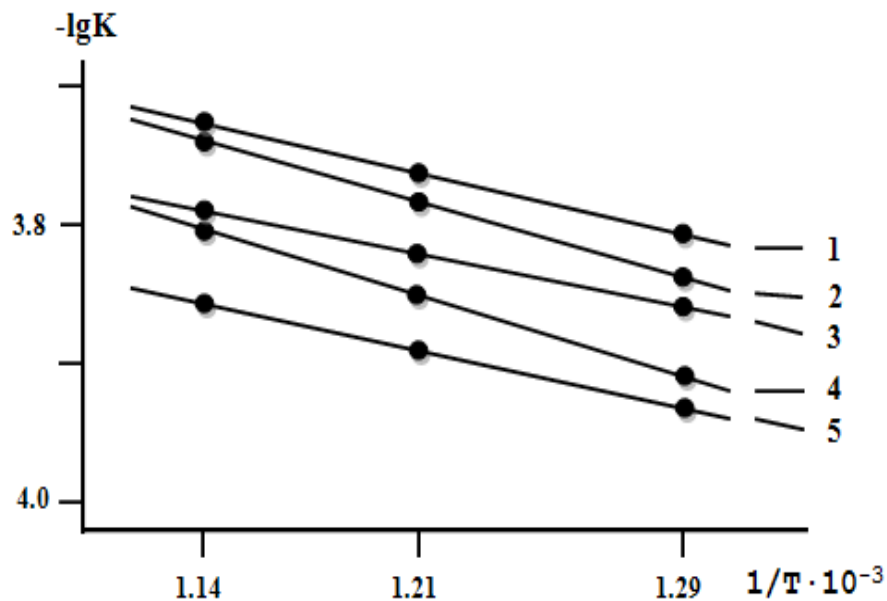


Рис. 5. Зависимость $-\lg K$ от $1/T$ для алюминиевого сплава $AlFe5Si10$, модифицированного свинцом, мас. %: 0.05(2); 0.1(3); 0.5(4); 1.0(5)

Fig. 5. Dependence of $-\lg K$ on $1/T$ for an aluminum alloy $AlFe5Si10$ modified with lead, wt. %: 0.05(2); 0.1(3); 0.5(4); 1.0(5)

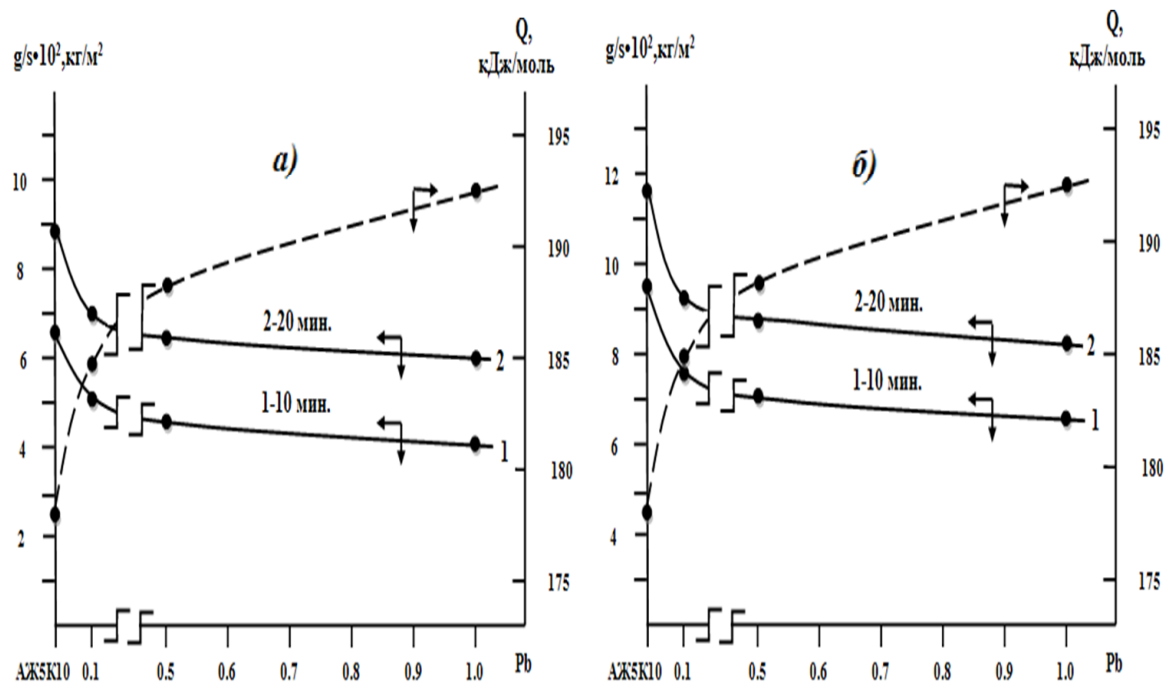
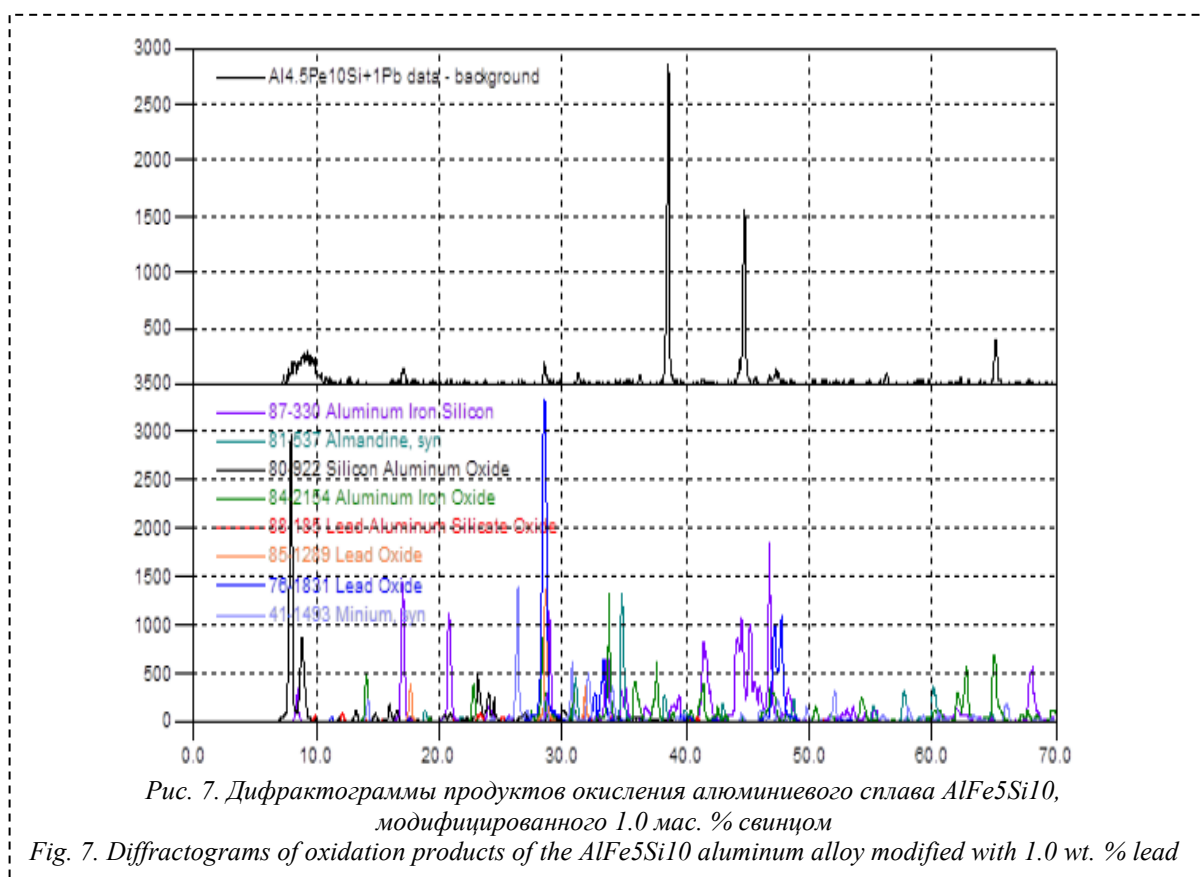


Рис. 6. Изохроны окисления алюминиевого сплава $AlFe5Si10$, модифицированного свинцом при 773 K (а) и 873 K (б)

Fig. 6. Oxidation isochrones of the $AlFe5Si10$ aluminum alloy modified with lead at 773 K (a) and 873 K (b)

По результатам исследований построены изохронные окисления алюминиевого сплава $AlFe5Si10$, содержащего различные концентрации свинца, которые представлены на Рис. 6. Кривые характеризуются монотонным увеличением скорости окисления с ростом температуры, как при 10-минутной выдержке

сплавов в окислительной атмосфере, так и при 20-минутной выдержке. Эта закономерность более четко выражается при исследованных температурах, о чем также свидетельствует увеличение величины кажущейся энергии активации окисления сплавов с ростом концентрации свинца.



Для изучения состава продуктов окисления образцов сплавов $AlFe_5Si_{10}$ в зависимости от содержания в них свинца использован метод рентгенофазового анализа, который проводился на приборе ДРОН-2.0. Для примера приведем диффрактограммы продуктов окисления в образце сплава $AlFe_5Si_{10}$ с содержанием 1.0 мас. % свинца (Рис. 7). На основании рентгенограммы можно заключить, что основными продуктами окисления в данном образце являются: Al_2O_3 ; $Al_4.5FeSi$; $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$; $Si_{11.96}Al_{0.04}O_{24}$; $AlFeO_3$; $Pb_{32}(Pb_4O_4)_8$ ($Al_{92}Si_{100}O_{384}$); PbO ; $Pb_2O_{3.333}$; Pb_3O_4 .

Заключение

Как известно, окисление металлов при высоких температурах приводит, как правило, к образованию на поверхности реагирования оксидной пленки или окалина. Образующаяся пленка оксида и определяет механизм окисления. Характер окисления зависит также от плотности образующегося в результате окисления оксида. Таким образом, методом термогравиметрии показано, что при легировании свинцом алюминиевого сплава $AlFe_5Si_{10}$ уменьшается скорость его окисления, что сопровождается ростом кажущейся энергии активации окисления сплавов от 178.0 до 192.5 кДж/моль. Скорость окисления сплавов имеет порядок 10^{-4} , $кг \cdot м^{-2} \cdot с^{-1}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. Москва : Металлургия, 1979. 640 с.

2. Shuang-Shuang Li, Xin Yue, Qing-Yuan Li, He-Li Peng, Bai-Xin Dong, Tian-Shu Liu, Hong-Yu Yang, Jun Fan, Shi-Li Shu, Feng Qiu, Qi-Chuan Jiang Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry // Journal of Materials Research and Technology. 2023. № 27. Pp. 944–983. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.09.274.

3. Dursun T. Costas Soutis Recent developments in advanced aircraft aluminum alloys // Materials & Design (1980-2015). 2014. № 56. Pp. 862–871. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.12.002.

4. Шанк Ф. А. Структуры двойных сплавов. Москва : Металлургия, 1973. 760 с.

5. Mário C. Santos Jr, Alisson R. Machado, Wisley F. Sales, Marcos A.S. Barrozo, Emmanuel O. Ezugwu Machining of aluminum alloys: a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. № 86. Pp. 3067–3080. DOI: 10.1007/s00170-016-8431-9.

6. Stojanovic B., Bukvic M., Epler I. Application of aluminum and aluminum alloys in engineering // Applied Engineering Letters. 2018. № 2(3). Pp. 52–62. DOI: 10.18485/aeletters.2018.3.2.2.

7. Вол А. Е. Строение и свойства двойных металлических систем. Т. 1. Москва : Физматгиз, 1959. 755 с.

8. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. Т. 1. Москва : Металлургия, 1962. 608 с.

9. Эллиот Р. П. Структуры двойных сплавов. Т. 1. Москва : Металлургия, 1970. 456 с.

10. Умарова Т. М., Ганиев И. Н. Анодные

сплавы алюминия с марганцем, железом и редкоземельными металлами. Душанбе : Дониш. 2009. 232 с.

11. Ганиев И. Н., Бокиев Л. А., Хакимов А. Х., Джайлоев Д. Х., Якубов У. Ш. Кинетика окисления алюминиевого сплава АЖ5К10 с церием // Вестник Технологического университета (г. Казань). 2020. № 8(23). С. 35–38.

12. Ганиев И. Н., Джайлоев Дж. Х., Рашидов А. Р., Якубов У. Ш., Зувайдуллозода Ф. З. Кинетика окисления сплавов алюминия с никелем в твердом состоянии // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2020. № 1. С. 104–108. DOI: 10.46418/2079-8199_2020_1_14.

13. Ганиев И. Н., Якубов У. Ш., Хакимов А. Х., Джайлоев Д. Х. Кинетика окисления алюминиевого сплава АЖ5К10,

модифицированного кальцием, в твердом состоянии // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. 2020. № 3. С. 172–181.

14. Ганиев И. Н., Сафаров А. Г., Одинаев Ф. Р., Якубов У. Ш., Ганиева Н. И. Влияние добавок свинца на кинетику окисления сплава АЖ4.5, в твердом состоянии // В сборнике: Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XXI Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Под редакцией Е. В. Протопопова. 2019. С. 245–250.

15. Джайлоев Д. Х., Ганиев И. Н., Ганиева Н. И., Якубов У. Ш., Хакимов А. Х. Кинетика окисления алюминиевого сплава АЖ2.18, модифицированного стронцием // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2019. № 4 (30). С. 34–39.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Якубов Умарали Шералиевич – д.т.н. (PhD), ведущий научный сотрудник лаборатории «Материаловедение» Института химии имени В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана (734063, г. Душанбе, проспект Айни 299/2), e-mail: yakubovumarali@gmail.com

Ганиев Изатулло Наврузович – д.х.н., профессор, академик НАН Таджикистана, зав. лабораторией «Коррозионностойкие материалы» Института химии имени В. И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана (734063, г. Душанбе, проспект Айни 299/2), e-mail: ganievizatullo48@gmail.com;

Сафаров Амиршо Гоибович – д.т.н., доцент, руководитель Центра исследования и использования возобновляемых источников энергии (ЦИИВИЭ) при Физико-техническом институте им. С. У. Умарова НАН Таджикистана (734063, г. Душанбе, проспект Айни 299/3), e-mail: amirsho71@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Умарали Шералиевич Якубов – 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.

Изатулло Наврузович Ганиев – 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.

Амиршо Гоибович Сафаров – 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

OXIDATION KINETICS OF ALUMINIUM ALLOY AlFe5Si10 MODIFIED BY LEAD

Umarali Sh. Yakubov¹, Izatullo N. Ganiev¹,
Amirsho G. Safarov²

¹ V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan,

² S.U. Umarov Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Tajikistan

* for correspondence: yakubovumarali@gmail.com

**Article info**

Received:

05 November 2025

Accepted for publication:

15 May 2026

Accepted:

11 June 2026

Published:

29 June 2026

Keywords: aluminum alloy
AlFe5Si10 lead,
thermogravimetric method,
oxidation kinetics, true oxidation
rate, apparent activation energy

Abstract.

It is known that commercial-grade aluminum with an increased content of iron, silicon, and other impurities cannot be widely used in industry due to its low service properties. Therefore, the development of new alloy compositions based on such metal is a highly relevant task. Among the promising alloy compositions on the aluminum–iron phase diagram are the eutectic (α -Al + Al₃Fe) and hypereutectic alloys, which, having a minimal crystallization interval, can contain up to 5 wt. % iron. An alloy of this composition was additionally alloyed with 10 wt. % silicon and modified with lead. The aim of this work is to determine the effect of lead as a modifier on the kinetics of the high-temperature oxidation process of the AlFe5Si10 aluminum alloy in the solid state. To achieve the stated objective, the results of a study on the oxidation kinetics of a lead-modified aluminum alloy AlFe5Si10 (Al + 5 wt. % Fe + 10 wt. % Si) in the solid state were analyzed. The experiments were carried out using the thermogravimetric method in air at atmospheric pressure within the temperature range of 773–873 K. It was established that the oxidation process over the entire investigated temperature range is described with high accuracy by a fourth-degree polynomial. During the experiments, a periodic variation in the oxidation rate over time was observed. The kinetic and energetic parameters of the alloy oxidation process were determined. It was found that at temperatures of 773, 823 and 873 K, the addition of lead in concentrations up to 1.0 wt. % reduces the oxidizability of the AlFe5Si10 aluminum alloy, while the effective activation energy increases. The oxidation rates of the alloys at the investigated temperatures are on the order of 10^{-4} kg·m⁻²·sec⁻¹. The X-ray phase analysis method was used to study the composition of the oxidation products of AlFe5Si10 alloy samples, depending on their lead content. It was shown that the oxidation products of the alloys are: Al₂O₃; Al_{4,5}FeSi; Fe₃Al₂(SiO₄)₃; Si_{11.96}Al_{0.04}O₂₄; AlFeO₃; Pb₃₂(Pb₄O₄)₈ (Al₉₂Si₁₀₀O₃₈₄); PbO; Pb₂O_{3.333}; Pb₃O₄.

For citation: Yakubov U.Sh., Ganiev I.N., Safarov A.G. Kinetics of oxidation of an aluminum alloy AlFe5Si10 modified with lead. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 2(174):90-100. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-90-100, EDN: REYTCO

REFERENCES

- Mondolfo L.F. Structure and Properties of Aluminum Alloys. Moscow: Metallurgy; 1979. 640 p.
- Shuang-Shuang Li, Xin Yue, Qing-Yuan Li, He-Li Peng, Bai-Xin Dong, Tian-Shu Liu, Hong-Yu Yang, Jun Fan, Shi-Li Shu, Feng Qiu, Qi-Chuan Jiang Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023; 27:944–983. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.09.274.
- Dursun T. Costas Soutis Recent developments in advanced aircraft aluminum alloys. *Materials & Design* (1980-2015). 2014; 56:862–871. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.12.002.
- Shank F.A. Structures of Dual Alloys. Moscow: Metallurgy; 1973. 760 p.
- Mário C. Santos Jr, Alisson R. Machado, Wisley F. Sales, Marcos A.S. Barrozo, Emmanuel O. Ezugwu Machining of aluminum alloys: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016; 86:3067–3080. DOI: 10.1007/s00170-016-8431-9.
- Stojanovic B., Bukvic M., Epler I. Application of aluminum and aluminum alloys in engineering. *Applied Engineering Letters*. 2018; 2(3):52–62. DOI: 10.18485/aeletters.2018.3.2.2.
- Vol A.E. Structure and Properties of Binary Metal Systems. Vol. 1. Moscow: Fizmatgiz; 1959. 755 p.
- Hansen M., Anderko K. Structures of Binary Alloys. Vol. 1. Moscow: Metallurgizdat; 1962. 608 p.
- Elliot R.P. Structures of Dual Alloys. Vol. 1. Moscow: Metallurgy; 1970, 456 p.
- Umarova T.M., Ganiev I.N. Anodic Alloys of Aluminum with Manganese, Iron, and Rare-Earth Metals. Dushanbe: Donish; 2009. 232p.
- Ganiyev I.N., Bokiyev L.A., Khakimov A.Kh., Dzhayloyev D.Kh., Yakubov U.Sh. Kinetics of Oxidation of the AZh5K10 Aluminum Alloy with Cerium. *Bulletin of the Technological University (Kazan)*. 2020; 8(23):35–38.
- Ganiyev I.N., Dzhayloyev Dzh.Kh., Rashidov A.R., Yakubov U.Sh., Zuvaydullozoda F.Z. Kinetics of Oxidation of Aluminum Alloys with Nickel in the Solid State. *Bulletin of the Saint Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and Technical Sciences*. 2020; 1:104–108. DOI: 10.46418/2079-8199_2020_1_14.

13. Ganiyev I.N., Yakubov U.Sh., Khakimov A.Kh., Dzhayloyev D.Kh. Kinetics of Oxidation of the AZh5K10 Aluminum Alloy Modified with Calcium in the Solid State. *Bulletin of Tajik National University. Series of Natural Sciences*. 2020; 3:172–181.

14. Ganiev I.N., Safarov A.G., Odinaev F.R., Yakubov U.Sh., Ganieva N.I. Influence of lead additives on the oxidation kinetics of the AZh4.5 alloy in the solid state. *In the collection: Metallurgy: Technologies,*

Innovations, and Quality. Proceedings of the XXI International Scientific and Practical Conference. In 2 parts. Edited by E.V. Protopopov. 2019. Pp. 245–250.

15. Dzhailoev D.Kh., Ganiev I.N., Ganieva N.I., Yakubov U.Sh., Khakimov A.Kh. Kinetics of Oxidation of the AZh2.18 Aluminum Alloy Modified with Strontium. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2019; 4(30):34–39.

© 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:

Umarali Sh. Yakubov – Doctor (PhD) in Technical Sciences, Leading Researcher at the Materials Science Laboratory of the V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan (734063, Dushanbe, 299/2 Aini Avenue), e-mail: yakubovumarali@gmail.com;

Izatullo N. Ganiev – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Head of Laboratory "Corrosion-resistant Materials" of the V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan (734063, Dushanbe, Aini Avenue 299/2), e-mail: ganievizatullo48@gmail.com;

Amirsho G. Safarov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Center for Research and Use of Renewable Energy Sources (CRUES) at the S.U. Umarov Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Tajikistan (734063, Dushanbe, 299/3 Aini Avenue), e-mail: amirsho71@mail.ru.

Contribution of the authors:

Umarali Sh. Yakubov – setting the research task, conceptualization of the study, conclusions, writing the text, scientific management, collection and theoretical analysis of data, review of relevant literature, experimental research, processing and analysis of their results.

Izatullo N. Ganiev – setting the research task, conceptualization of the study, conclusions, writing the text, scientific management, collection and theoretical analysis of data, review of relevant literature, experimental research, processing and analysis of their results.

Amirsho G. Safarov – formulation of research objectives, conceptualization of research, conclusions, writing of text, scientific management, collection and theoretical analysis of data, review of relevant literature, experimental research, processing and analysis of its results.

All authors have read and approved the final manuscript.

