

МЕТАЛЛУРГИЯ ВА МАВОДШИНОСӢ - МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ - METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

УДК 669.45.018.8.24/884

КИНЕТИКА ОКИСЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОВОДНИКОВОГО СПЛАВА $AlTi0.1$ С КАЛИЕМ В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

¹Ф.Ш. Зокиров, ¹И.Н. Ганиев, ²Г.М. Рахматуллоева, ¹М.М. Махмадизода¹Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими,²ГУ «Центр по исследованию инновационных технологий

НАН Таджикистана»

В настоящее время во многих областях техники растет интерес к жаропрочным материалам на основе алюминиевых сплавов, которые применяются в электротехнике, а также при изготовлении жаропрочных проводов для высоковольтных линий электропередачи. В работе представлены результаты термогравиметрического исследования взаимодействия алюминиевого проводникового сплава $AlTi0.1$, содержащего калий, с кислородом воздуха в интервале 723-823 К в твердом состоянии. Определены кинетические параметры процесса окисления. Показано, что добавки калия до 0.5 мас.% увеличивают скорость окисления алюминиевого проводникового сплава $AlTi0.1$, что сопровождается снижением кажущейся энергии активации процесса окисления со 140.00 до 117.11 кДж/моль. Процесс окисления сплавов подчиняется гиперболическому уравнению.

Ключевые слова: алюминиевый сплав $AlTi0.1$, калий, термогравиметрический метод, кинетика окисления, истинная скорость окисления, энергия активации окисления.

КИНЕТИКАИ ОКСИДШАВИИ ХӢЛАИ НОҚИЛИ АЛЮМИНИИ $AlTi0.1$ БО КАЛИЙ ДАР ҲОЛАТИ САХТ

Ф.Ш. Зокиров, И.Н. Ганиев, Г.М. Рахматуллоева, М.М. Махмадизода

Дар айни замон, дар бисёр соҳаҳои техника таваҷҷӯҳ ба масолеҳи ба гармӣ тобовар дар асоси хӯлаҳои алюминий зиёд шудааст. Онҳо дар электротехника барои истеҳсоли ноқилҳои ба гармӣ тобовар ва хатҳои баландшиддати электр истифода мебаранд. Дар мақола натиҷаҳои омӯзиши термогравиметрии таъсири мутақобилаи хӯлаи ноқили алюминийи $AlTi0.1$ дорои калий, дар атмосфера ҳаво дар ҳудуди 723-823 К, дар ҳолати сахт оварда шудааст. Параметрҳои кинетикии раванди оксидшавӣ муайян карда шуданд. Маълум шуд, ки иловаи калий то 0,5 мас.% суръати оксидшавии хӯлаи ноқили алюминийи $AlTi0.1$ -ро зиёд мекунад, ки ин бо камшавии энергияи намоёни ғайлошавии раванди оксидшавӣ аз 140.00 то 117.11 кҶ/мол мувофиқ мебошад. Раванди оксидшавии хӯлаҳо ба муодилаи гиперболии итоат мекунад.

Калидвожаҳо: хӯлаи алюминий $AlTi0.1$, калий, усули термогравиметрӣ, кинетикаи оксидшавӣ, суръати оксидшавии ҳақиқӣ, энергияи ғайлошавӣ.

KINETICS OF OXIDATION OF ALUMINUM CONDUCTOR ALLOY $AlTi0.1$ WITH POTASSIUM IN THE SOLID STATE

F.Sh. Zokirov, I.N. Ganiev, G.M. Rakhmatulloeva, M.M. Mahmadi-zoda

Currently, in many fields of technology, there is a growing interest in heat-resistant materials based on aluminum alloys, which are used in electrical engineering, as well as in the manufacture of heat-resistant wires for high-voltage power lines. The paper presents the results of a thermogravimetric study of the interaction of an aluminum conductor alloy $AlTi0.1$ containing potassium with atmospheric oxygen in the range of 723-823 K in the solid state. Kinetic parameters of the oxidation process are determined. It has been shown that potassium supplements up to 0.5 wt.% increase the rate of oxidation of the aluminum conductor alloy $AlTi0.1$, which is accompanied by a decrease in the apparent activation energy of the oxidation process from 140.00 to 117.11 kJ/mol. The oxidation process of alloys obeys a hyperbolic equation.

Keywords: aluminum alloy $AlTi0.1$, potassium, thermogravimetric method, oxidation kinetics, true oxidation rate, oxidation activation energy.

Введение

В последние годы значительно возросло использование алюминиевых сплавов в электротехнических целях вместо меди, что позволило существенно снизить вес кабельной продукции [1].

Хорошо известно, что достижение прочности в алюминиевых сплавах путем образования твердых растворов крайне нежелательно с точки зрения повышения электропроводности. Однако противоречивый характер прочности и электропроводности в этих материалах побуждает искать баланс между этими свойствами [2-3].

Алюминий и его сплавы находят очень широкое применение в различных областях, таких как авиастроение, космонавтика, транспорт, электротехника, строительство, упаковка, электроника, кухонная утварь и т. д., главным образом благодаря своему малому весу, коррозионной стойкости и хорошим электрическим и механическим свойствам. Высокое соотношение прочности к массе (прочность/вес) алюминиевых сплавов превосходит таковое практически все другие конструкционные материалы. Алюминий относится к легким металлам, и его прочность может быть улучшена путем легирования и термической обработки [4-5]. В настоящее время исследователи и ученые во всем мире сосредоточили своё внимание на улучшении как механических, так и электрических свойств алюминия для его использования в широком спектре приложений.

В последние два десятилетия в связи с ростом спроса со стороны линий электропередачи медь заменяется алюминием благодаря её малому весу и относительно низкой стоимости [6]. Кроме того, среди конструкционных проводниковых материалов алюминий обладает очень хорошей электропроводностью благодаря низкому удельному весу (практически второй после меди). Замена меди алюминием для передачи электроэнергии, например, на проводах ACSR (алюминиевые стальные проводники), силовых кабелях и т.д., растёт во всём мире. Более того, замена меди алюминием происходит и в странах, обладающих достаточными ресурсами меди, поскольку алюминий демонстрирует существенные экономические преимущества в качестве серьёзного конкурента меди.

Электропроводность алюминия достаточно высока благодаря огромному количеству свободных электронов, вращающихся вокруг его кристаллической решетки [7]. Однако электропроводность технически чистого алюминия выше, чем у всех алюминиевых материалов и сплавов. Его применение ограничено из-за очень низкой механической прочности и вязкости [8-10].

Спрос на высокопрочные и электропроводящие алюминиевые сплавы для линий электропередачи (например, для производства проводов и кабелей) возрос. На практике, добавляя легирующие элементы к чистому алюминию, можно значительно повысить его прочность. Однако, с другой стороны, происходит значительное снижение электропроводности из-за растворенных атомов и примесей, образующихся при замещении легирующих элементов. Другим процессом, влияющим на электропроводность алюминия, является термическая обработка, поскольку элементы в твердом растворе обладают более высоким сопротивлением, чем нерастворенные элементы. Поэтому крайне важно подобрать прочность чистого алюминия таким образом, чтобы снижение его электропроводности оставалось приемлемым и соответствовало выбранному применению.

Поскольку электропроводность и механическая прочность являются важнейшими свойствами для производства проводниковых материалов, разработка алюминиевого проводника с подходящим сочетанием приемлемой прочности и высокой электропроводности является основным условием использования алюминия в кабелях электропередачи. Электропроводность зависит от микроструктуры металлического материала, поскольку она очень чувствительна к нарушениям рассеяния электронов, вызванным любыми дефектами или растворенными веществами в кристаллической структуре. Для большинства алюминиевых сплавов, упрочнённых старением, было обнаружено, что зависимость между электропроводностью, твёрдостью и пределом прочности на разрыв имеет «С-образную» форму [11]. Изначально твёрдость алюминиевых сплавов, упрочняемых старением, снижается по мере увеличения электропроводности из-за ограниченной растворимости в твёрдом растворе, что влияет на скорость выделения и приводит к образованию множества различных фаз. Противоположная тенденция наблюдается при высоких температурах, поскольку низкая электропроводность связана с более высокими значениями твёрдости (что может быть связано с обратным растворением выделений в основных элементах матрицы) [11]. Соответственно, в научно-исследовательской деятельности основное внимание уделяется разработке высокопрочных алюминиевых сплавов с высокими электропроводными свойствами с помощью новых методов обработки и изготовления [12]. Улучшение свойств может быть достигнуто многими методами, такими как холодная обработка, термическая обработка и добавление легирующих элементов в алюминиевую матрицу. Добавление легирующих элементов, включая микроэлементы, основные элементы и микроструктурные примеси, позволяет контролировать требуемую прочность и электропроводность сплава.

Такие легирующие элементы, как медь, магний и серебро, обеспечивают превосходные механические свойства сплава при более высоких температурах. Кроме того, сопротивление ползучести улучшается благодаря равномерному и мелкодисперсному распределению выделений, образующихся по границам [13-15].

Высокое сродство алюминия к кислороду приводит к быстрому образованию защитного, но высокостойкого оксида на его поверхности [16]. Хотя оксид важен для защиты алюминия от коррозии, он ухудшает внешнюю поверхность проводника, ухудшает его проводимость и нежелателен для электрических применений. При подключении окисленного проводника без предварительной обработки повышенное контактное сопротивление приводит к повышению температуры, что ускоряет окисление [17]. Толстый оксидный слой дополнительно увеличивает сопротивление и температуру электрического соединения, что может привести к перегреву.

Сплавы, содержащие титан, широко применяются в качестве легирующей добавки при выплавке коррозионностойких и жаропрочных сталей, для снижения вредного влияния азота, серы, измельчения литого зерна и повышения механических свойств. Использование лигатур алюминия с титаном позволяет понизить остаточное содержание кислорода и неметаллических включений. С другой стороны, алюминий является распространенной легирующей добавкой в производстве титановых сплавов, применяемых в новой технике [18].

Высокотемпературное окисления титана изучалось многими авторами [22]. В работе [23] показано, что титан окисляется со скоростями, подчиняющимися равным уравнениям в зависимости от температуры и времени. Достаточно подробно исследована и окисляемость твердых сплавов титана с алюминием [24]. Установлено положительное влияние алюминия на жаростойкость титана.

Дополнительную информацию об особенностях окисления этих сплавов может дать изучение образующихся окисных пленок. В системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ отмечается крайне низкая растворимость TiO_2 в Al_2O_3 [18] и существование одного химического соединения Al_2TiO_5 (1850 °C) [18]. При более низких температурах оно подвергается эвтектическому распаду на рутил и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Так, по данным [18-24], рентгенографический анализ

смесей Al_2O_3 и TiO_2 , нагретых на воздухе до 1700°C с различным временем выдержки, не показал заметных смещений линий, характерных для обожженного глинозема. Во всех случаях, когда в образцах наблюдалась вторая фаза, она соответствовала соединению Al_2TiO_5 .

В работах [18-24] представлены результаты рентгеноструктурного анализа смесей синтетических сплавов $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$, содержащих 0; 0.5; 1.0; 5.0; 10; 50 и 100 мол. % TiO_2 . Из этих данных следует, что добавка до 5 мол. % TiO_2 к корунду вызывает ощутимую деформацию решетки Al_2O_3 , а последующее повышение содержания TiO_2 не влияет на ее параметры. По-видимому, при температурах спекания (1800°C) в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ возможно растворение до 5 мол. % TiO_2 , и подтверждением этому является то, что выделение новой фазы фиксируется в смесях, содержащих более 5.0 мол. % TiO_2 , и особенно отчетливо она проявляется в сплавах эквивалентного состава.

Спектр применения щелочных металлов в современном мире чрезвычайно широк. Эти элементы (Li, Na, K, Rb и Cs) широко используются благодаря уникальному сочетанию физических и химических свойств, таких как низкая плотность и вязкость, высокие температуры плавления (от 301.59 K (Cs) до 453.69 K (Li) при стандартном атмосферном давлении), высокие температуры плавления (от 943 K (Cs) до 1615 K (Li) в жидком состоянии), теплопроводность, электропроводность и многие другие свойства [25].

В литературе известно применение щелочных металлов в качестве модификаторов алюминиево-кремниевых сплавов [26, 27]. Однако сведения о влиянии калия на физико-химические свойства алюминиево-титановых сплавов отсутствуют.

В настоящее время в литературе отсутствуют данные о влиянии добавки калия на кинетику окисления алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 . Целью данной работы является исследование влияния добавки калия на кинетику твердофазного окисления алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 .

Материалы и методики исследования

Для исследования влияния добавок калия в диапазоне 0.01 – 0.5 мас. % на кинетику окисления алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 в твердом состоянии были получены серии сплавов. Сплавы с калием получали в шахтной печи сопротивления типа СШОЛ в тиглях из оксида алюминия при температуре $723\text{--}823\text{ K}$. Легирование проводили с учетом угара металла. В качестве сплавов для исследования использовали алюминий марки А5 (ГОСТ 110669-01), титан марки ТГ-90 (ГОСТ 19807-91) с алюминиевым сплавом (Al+2.0 мас. % Ti) и металлический калий марки К (ГОСТ 10588-75) в виде лигатуры (Al+10.0 мас. % K).

Кинетику окисления сплавов изучали методом термогравиметрии в изотермических условиях в атмосфере воздуха по методике, описанной в работах [18, 28-34]. Схема установки приведена на рис. 1.

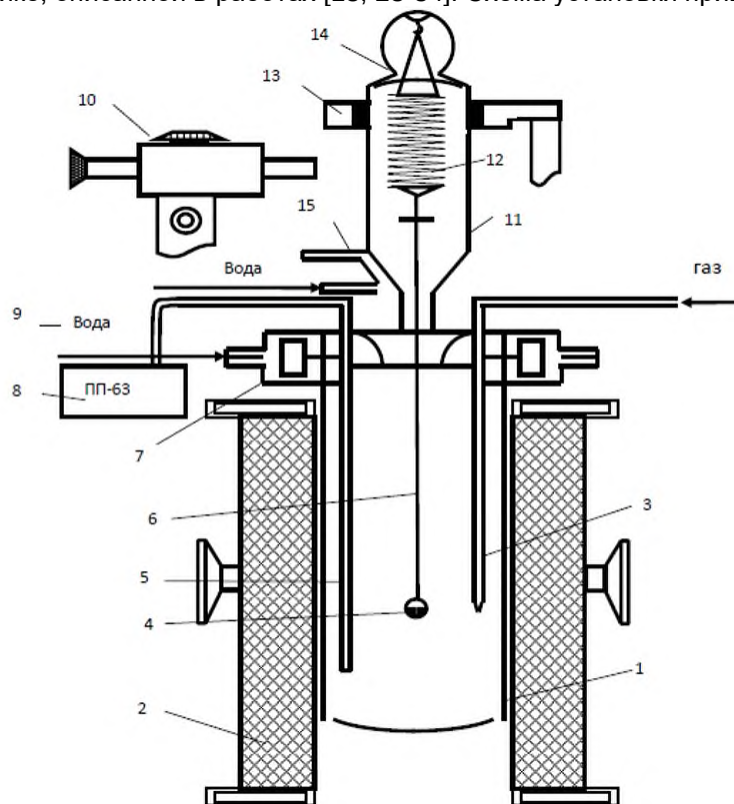


Рисунок 1 – Схема установки для изучения кинетики окисления металлов и сплавов: 1- печь Таммана; 2-чехол из оксида алюминия; 3- газопроводящая трубка; 4- тигель; 5- термopара; 6- платиновая нить; 7- водоохлаждаемая крышка; 8- потенциометр; 9- вода; 10- катетометр; 11- чехол из молибденового стекла; 12- пружина из молибденовой проволоки; 13- подставка; 14- крышка; 15- трон и холодильник

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Результаты исследования окисления алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1, легированного калием, представлены на рисунках 2, 3 и в таблицах 1, 2. Кривые окисления сплавов характеризуются увеличением привеса образцов в первые 15-20 минут от начала окисления. Затем процесс стабилизируется, что связано с образованием защитной оксидной пленки на поверхности реагирования (рис. 2).

Таблица 1 – Кинетические характеристики процесса окисления алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с калием в твердом состоянии

Содержание калия в сплаве, мас. %	Температура окисления, К	Истинная скорость окисления $K \cdot 10^4$, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$\ln K$	Наклон линии $\frac{\Delta(\ln K)}{\Delta(\frac{1}{T})}$, К	Кажущаяся энергия активации, кДж/моль
0.0	723	0.697	-9.571	-16856.857	140.00
	773	2.700	-8.217		
	823	11.25	-6.789		
0.01	723	0.883	-9.334	-16059.280	133.51
	773	3.092	-8.081		
	823	12.50	-6.684		
0.05	723	1.075	-9.138	-15559.049	129.35
	773	3.883	-7.853		
	823	14.00	-6.571		
0.1	723	1.234	-8.999	-14950.539	124.30
	773	4.187	-7.778		
	823	14.55	-6.532		
0.5	723	1.471	-8.823	-14086.519	117.11
	773	4.708	-7.661		
	823	15.04	-6.498		

K-Истинная скорость окисления;

Q-Кажущаяся энергия активации окисления.

На рисунке 2 представлены кинетические кривые изменения удельной массы (m/s) образцов сплава в зависимости от времени (t) взаимодействия газовой фазы с кислородом и температуры. По-видимому, образующаяся на начальных стадиях процесса оксидная пленка не обладает достаточными защитными свойствами, о чем свидетельствует увеличение скорости окисления исследуемых сплавов (рис. 2). Скорость окисления алюминиевого проводникового сплава, содержащего 0,5 мас. % калия, при температурах 723, 773 и 823 К составляет $1.471 \cdot 10^{-4}$, $4.708 \cdot 10^{-4}$ и $15.04 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ соответственно (таблица 1).

Квадратичные кинетические кривые процесса окисления алюминиевого проводникового сплава имеют нелинейный характер, что свидетельствует о непараболическом характере процесса окисления этих сплавов (рис. 3).

Эффективная энергия активации процесса высокотемпературного окисления исследуемых сплавов составляет от 133.51 до 117.11 кДж/моль (таблица 1). В таблице 2 приведены полиномы квадратичных кинетических кривых окисления сплавов, которые описываются общим уравнением $y = k \cdot x^n$, где $n = 1 \div 4$. Видно, что квадратичные кривые описываются гиперболическим уравнением.

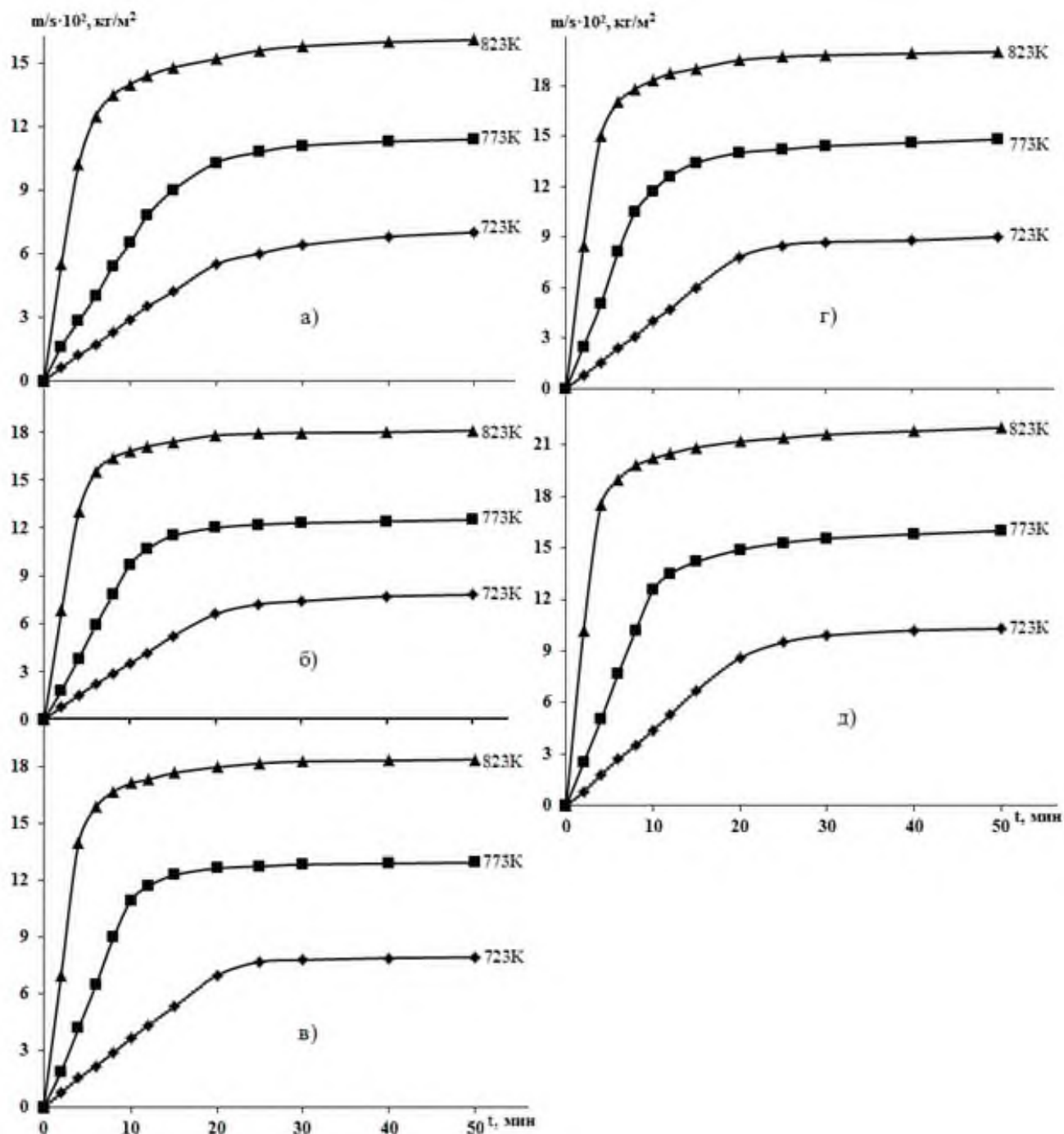


Рисунок 2 – Кинетические кривые окисления алюминиевого проводникового сплава $AlTi_{0.1}$ (а), содержащего калий, мас. %: 0,01 (б); 0,05 (в); 0,1 (г); 0,5 (д), в твердом состоянии

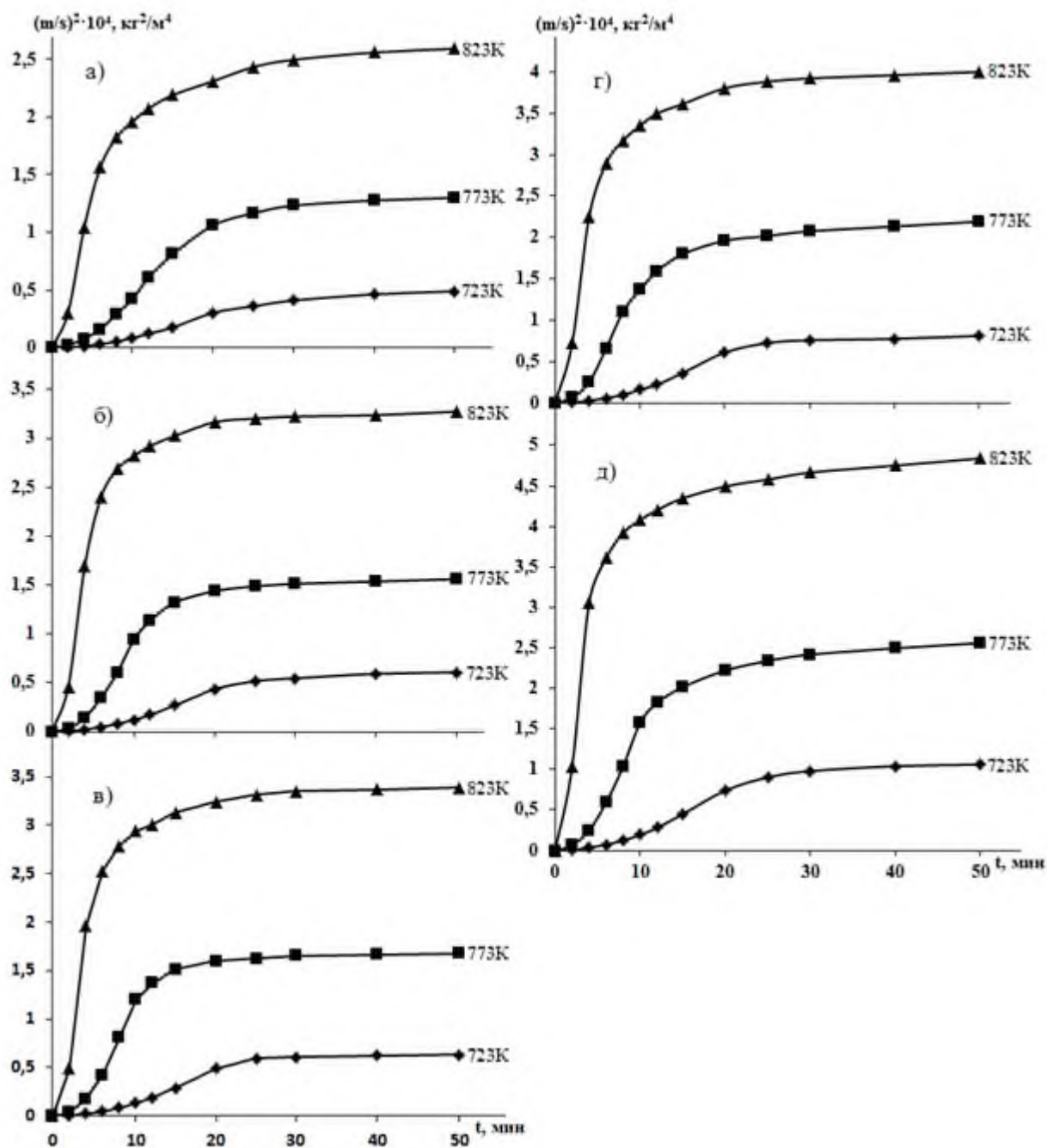


Рисунок 3 - Квадратичные кинетические кривые окисления алюминиевого проводникового сплава AlTi_{0.1} (а), содержащего калий, мас. %: 0,01 (б); 0,05 (в); 0,1 (г); 0,5 (д), в твердом состоянии

Таблица 2 – Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с калием в твердом состоянии

Содержание калия в сплаве, мас. %	Температура окисления, К	Полиномы квадратичных кинетических кривых окисления сплавов	Коэффициент корреляции (R ²)
0.0	723	$(m/s)^2 = -2 \cdot 10^{-9}t^6 + 2 \cdot 10^{-7}t^5 - 1 \cdot 10^{-5}t^4 + 2 \cdot 10^{-4}t^3 - 7 \cdot 10^{-4}t^2 + 3.6 \cdot 10^{-3}t^{**}$	0,999
	773	$(m/s)^2 = -2 \cdot 10^{-9}t^6 + 2 \cdot 10^{-7}t^5 - 2 \cdot 10^{-6}t^4 - 3 \cdot 10^{-4}t^3 + 8.4 \cdot 10^{-3}t^2 - 1.16 \cdot 10^{-2}t$	0,999
	823	$(m/s)^2 = 2 \cdot 10^{-8}t^6 - 2 \cdot 10^{-6}t^5 + 1 \cdot 10^{-4}t^4 - 1.9 \cdot 10^{-3}t^3 + 5.5 \cdot 10^{-3}t^2 + 0.255t$	0,990
0.01	723	$(m/s)^2 = -3 \cdot 10^{-9}t^6 + 5 \cdot 10^{-7}t^5 - 2 \cdot 10^{-5}t^4 + 4 \cdot 10^{-4}t^3 - 2.3 \cdot 10^{-3}t^2 + 9.4 \cdot 10^{-3}t$	0,999
	773	$(m/s)^2 = -1 \cdot 10^{-8}t^6 - 2 \cdot 10^{-6}t^5 + 1 \cdot 10^{-4}t^4 - 3.1 \cdot 10^{-3}t^3 + 3.8 \cdot 10^{-2}t^2 - 7.4 \cdot 10^{-2}t$	0,998
	823	$(m/s)^2 = 2 \cdot 10^{-8}t^6 - 2 \cdot 10^{-6}t^5 + 1 \cdot 10^{-4}t^4 - 1.5 \cdot 10^{-3}t^3 - 9.6 \cdot 10^{-3}t^2 + 0.456t$	0,981
0.05	723	$(m/s)^2 = -4 \cdot 10^{-9}t^6 + 6 \cdot 10^{-7}t^5 - 3 \cdot 10^{-5}t^4 + 6 \cdot 10^{-4}t^3 - 3.5 \cdot 10^{-3}t^2 + 1.28 \cdot 10^{-2}t$	0,999
	773	$(m/s)^2 = 2 \cdot 10^{-8}t^6 - 3 \cdot 10^{-6}t^5 + 2 \cdot 10^{-4}t^4 - 4.6 \cdot 10^{-3}t^3 + 5.34 \cdot 10^{-2}t^2 - 0.104t$	0,996
	823	$(m/s)^2 = 1 \cdot 10^{-8}t^6 - 2 \cdot 10^{-6}t^5 + 7 \cdot 10^{-5}t^4 - 6 \cdot 10^{-4}t^3 - 2.32 \cdot 10^{-2}t^2 + 0.536t$	0,971
0.1	723	$(m/s)^2 = -5 \cdot 10^{-9}t^6 + 7 \cdot 10^{-7}t^5 - 4 \cdot 10^{-5}t^4 + 7 \cdot 10^{-4}t^3 - 4 \cdot 10^{-3}t^2 + 1.36 \cdot 10^{-2}t$	0,998
	773	$(m/s)^2 = 2 \cdot 10^{-8}t^6 - 3 \cdot 10^{-6}t^5 + 2 \cdot 10^{-4}t^4 - 4.6 \cdot 10^{-3}t^3 + 5.16 \cdot 10^{-2}t^2 - 6.6 \cdot 10^{-2}t$	0,998
	823	$(m/s)^2 = 9 \cdot 10^{-9}t^6 - 8 \cdot 10^{-7}t^5 + 2 \cdot 10^{-5}t^4 + 7 \cdot 10^{-4}t^3 - 4.09 \cdot 10^{-2}t^2 + 0.665t$	0,984
0.5	723	$(m/s)^2 = -5 \cdot 10^{-9}t^6 + 7 \cdot 10^{-7}t^5 - 4 \cdot 10^{-5}t^4 + 7 \cdot 10^{-4}t^3 - 3.4 \cdot 10^{-3}t^2 + 1.29 \cdot 10^{-2}t$	0,999
	773	$(m/s)^2 = 2 \cdot 10^{-8}t^6 - 4 \cdot 10^{-6}t^5 + 2 \cdot 10^{-4}t^4 - 5.5 \cdot 10^{-3}t^3 + 6.42 \cdot 10^{-2}t^2 - 0.115t$	0,997
	823	$(m/s)^2 = -3 \cdot 10^{-10}t^6 + 5 \cdot 10^{-7}t^5 - 6 \cdot 10^{-5}t^4 + 3.2 \cdot 10^{-3}t^3 - 8.01 \cdot 10^{-2}t^2 + 0.95t$	0,982

m/s - *привес массы сплавов, кг/м²*;

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

Взаимодействие алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с различными концентрациями калия в газовой фазе при исследованных температурах существенно отличается от окисления исходного алюминиевого сплава. Линейная зависимость сохраняется в течение 12-15 мин, затем при образовании оксидной пленки характер процесса окисления меняется на гиперболический, а формирование защитной оксидной поверхности завершается через 20 мин.

Кинетические кривые процесса высокотемпературного окисления алюминиевых сплавов характеризуются монотонным ростом истинной скорости окисления и уменьшением эффективной энергии активации с увеличением количества легирующего компонента в исходном сплаве до 0.01 мас.%. Однако добавление 0.1 и 0.5 мас.% калия несколько увеличивает окислительную способность исходного сплава (рис. 4).

Кривые процесса высокотемпературного окисления в координатах $-\lg K$ от $1/T$ представляются прямыми линиями (рис. 5), по углу наклона которых рассчитана эффективная энергия активации сплавов. Среди легированных сплавов максимальную скорость окисления, соответствующую энергии активации 117.11 кДж/моль, имеет токопроводящий алюминиевый сплав AlTi0.1 с 0.5 мас. % калия, тогда как для исходного сплава последняя величина составляет 140.00 кДж/моль (таблица 1).

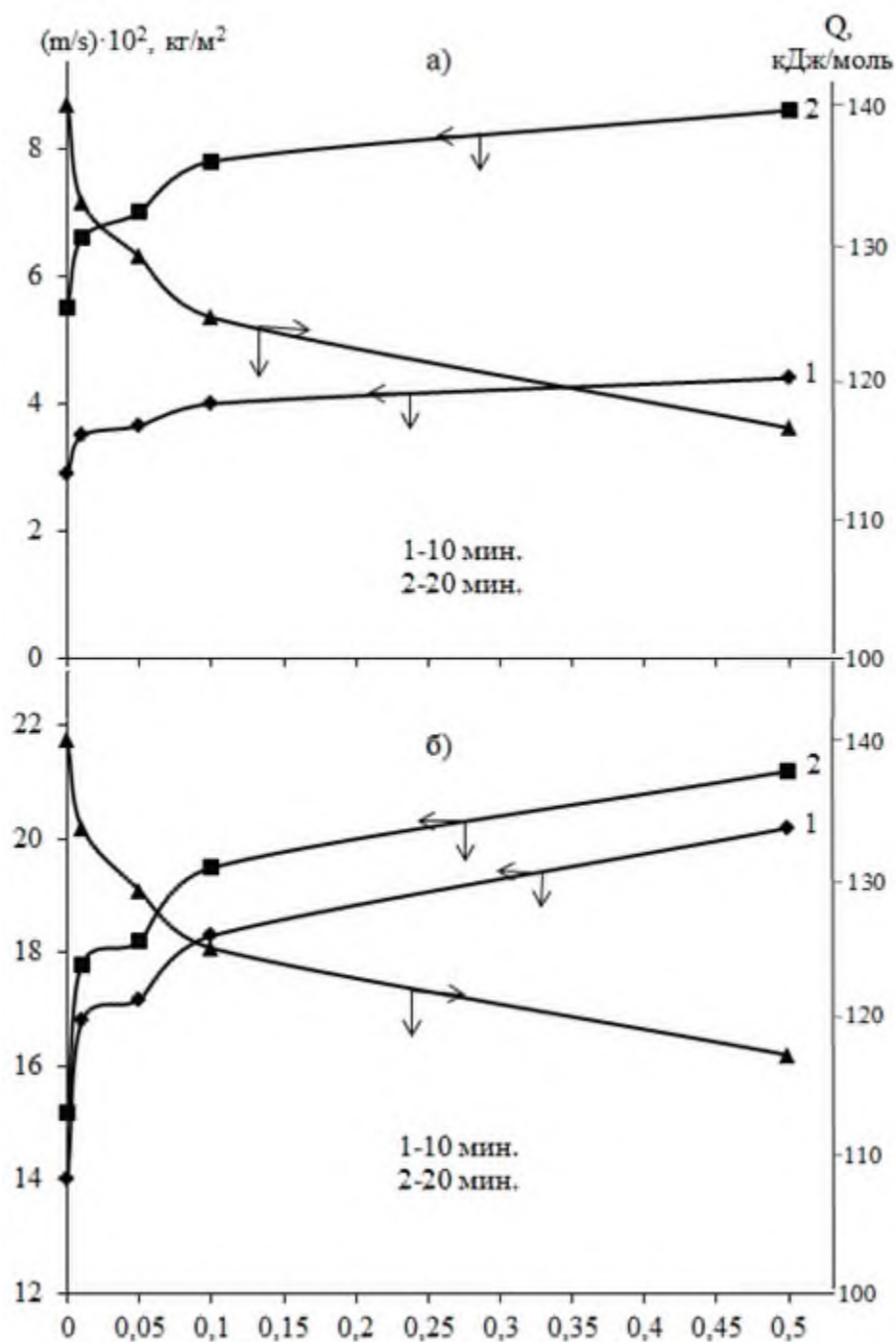


Рисунок 4 – Изохроны окисления алюминиевого проводникового сплава AlTi_{0.1} с калием при 723(а) К и 823 К (б)

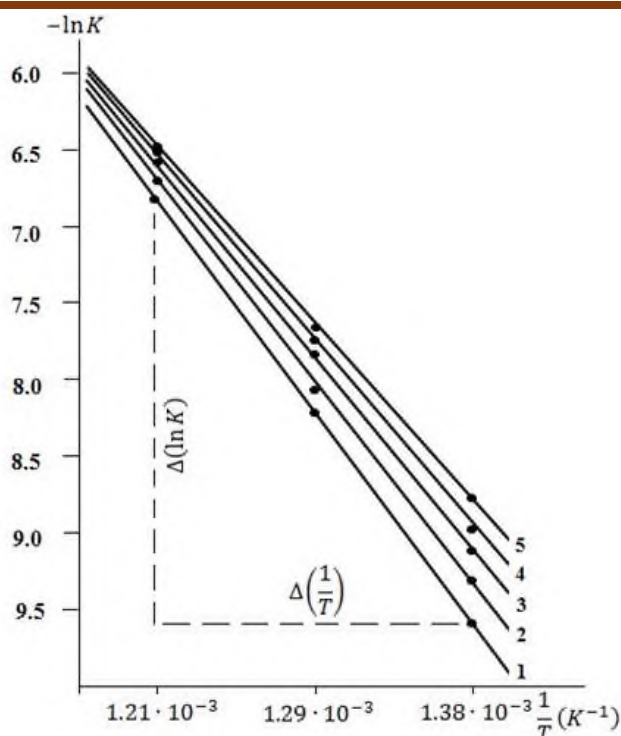


Рисунок 5 – Зависимости $-\ln K$ от $1/T$ для алюминиевого проводникового сплава $AlTi_{0.1}$ (1), содержащего калий, мас. %: 0.01(2); 0.05(3); 0.1 (4) и 0.5 (5)

Изучая продукты окисления сплавов, в частности оксидную пленку, образующуюся на поверхности образцов при нагревании, можно получить важную информацию о механизме их окисления. Оксидная пленка является продуктом взаимодействия металла с кислородом воздуха и снижает его химическую активность на поверхности сплава.

Методом рентгенофазового анализа изучены продукты окисления, образующиеся при окислении алюминиевого сплава с добавкой калия. По результатам рентгенофазового анализа продуктов окисления алюминиевого проводникового сплава $AlTi_{0.1}$ установлено, что при окислении образуются оксиды следующих составов: Al_2O_3 , Ti_3O_5 , TiO_2 , $Al_{21.86}K_{2.59}O_{34}$ (рис. 6).

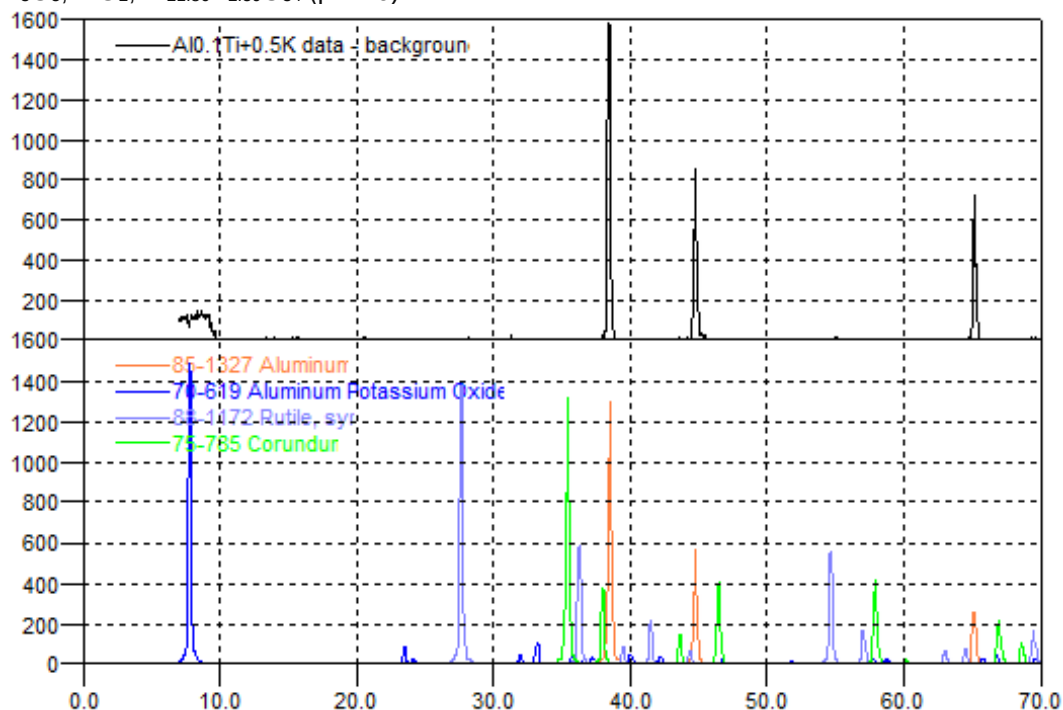


Рисунок 6 – Дифрактограммы продуктов окисления алюминиевого проводникового сплава $AlTi_{0.1}$ с калием

Заключение

На основании экспериментальных исследований кинетики окисления алюминиевых проводниковых сплавов с калием в твердом состоянии газовой фазой кислорода установлено, что сплавы с 0.1 и 0.5 мас. % калия, при этом сплавы с низким содержанием (0.01-0.1 мас. %), имеют наибольшее значение фактической скорости окисления и наименьшее значение эффективной энергии активации. Установлено, что легирующий компонент незначительно повышает окислительную способность алюминиевых сплавов в диапазоне 0.01-0.5 мас. % калия.

Рецензент: Бердиев А.Э. — д.т.н., профессор кафедры химии и биологии Российско-Таджикского (Славянского) университета

Литература

- ГОСТ Р МЭК 62004-2014. Проволока из термостойкого алюминиевого сплава для провода воздушной линии электропередачи. М.: Стандартинформ, 2015.
- Polmear I.J. Light Alloys - From Traditional Alloys to Nanocrystals. Fourth Edition. Australia, Melbourne: Monash University. 2006.
- Moors E.H.M. Technology strategies for sustainable metals production systems: a case study of primary aluminium production in The Netherlands and Norway // Journal of Cleaner Production. 2006. Vol. 14. P. 1121-1138.
- Totten G.E., MacKenzie D.S. Handbook of Aluminum. Alloy Production and Materials Manufacturing; Marcel Dekker: New York, NY, USA, Vol. 2. 2003.
- Polmear I.J., Light Alloys—Metallurgy of the Light Metals; Arnold: London, UK. 1995.
- Abdo H.S., Khalil K.A., El-Rayes M.M., Marzouk W.W., Hashem A.M., Abdel-Jaber G.T. Ceramic nanofibers versus carbon nanofibers as a reinforcement for magnesium metal matrix to improve the mechanical properties. J. King Saud Univ. Eng. Sci. 2020. Vol. 32. P. 346–350.
- Holman J.P., Heat Transfer. McGraw-Hill Book Company: Singapore. 1990. P. 1–20.
- Meshchanov G.I., Peshkov I.B. Innovative approaches in domestic cable engineering. Russ. Electr. Eng. 2010. Vol. 81. P. 1–8.
- Vorontsova L.A., Maslov V.V., Peshkov I.B. Aluminum and Aluminum Alloys in Electrical Products; Energiya: Moscow, Russia. 1971.
- Lanker V. Metallurgy of Aluminum Alloys; William Clones and Sons Ltd., Chapman and Hall: London, UK. 1967. P. 236–248.
- Hagamaier D.J. Evaluation of heat damage to aluminium aircraft structures. Mater. Eval. 1982. Vol. 40. P. 942–969.
- Valiev R.Z., Murashkin M.Y., Ganeev A.V., Enikeev N.A. Superstrength of nanostructured metals and alloys produced by severe plastic deformation. Phys. Met. Metallogr. 2012. Vol. 113. P. 1193–1201.
- Bakavos D., Prangnell P.B., Bes B., Eberl F. The effect of silver on microstructural evolution in two 2xxx series Al-alloys with a high Cu:Mg ratio during ageing to a T8 temper. Mater. Sci. Eng. 2008. Vol. 491. P. 214–223.
- Fouly A., Almotairy S.M., Aijaz M.O., Alharbi H.F., Abdo H.S. Balanced Mechanical and Tribological Performance of High-Frequency-Sintered Al-SiC Achieved via Innovative Milling Route—Experimental and Theoretical Study. Crystals. 2021. Vol. 11. 700 p.
- Eddahbi M., Jiménez J.A., Ruano O.A. Microstructure and creep behaviour of an Osprey processed and extruded Al–Cu–Mg–Ti–Ag alloy. J. Alloys Compd. 2007. Vol. 433. P. 97–107.
- Nguyen L., Hashimoto T., Zakharov D., Stach E., Rooney A., Burnett T. Atomic-scale insights into the oxidation of aluminum. ACS Appl Mater Interfaces 2018. Vol. 10(3). P. 2230–2235.
- Smeltzer W. Oxidation of aluminum in the temperature range 400°–600°C. J Electrochem Soc. 1956. Vol. 103(4). P. 204–214.
- Лепинских Б.М., Китаев А.А., Белоусов А.А. Окисления жидких металлов и сплавов. М.: Наука, 1979. 116 с.
- Ozkan O., Moulson A. -J. Phys. D: Appl. Phys. 1970. v. 3, p. 983.
- Schmalzried H. -Z. Phys. Chem. (BRD), 1963. v. 38, p. 87.
- Fischer K., Ackerman W. -J. Appl. Phys., 1968. v. 39, p. 273.
- Анитов И., Горбунов С. ЖПХ, 1961. Т.34. №4. С. 725-734.
- Kofstad P., Hauffe K., Kjollesdal H. Acta chem. Scand., 1958. V.12. P. 239-269.
- Попова В., Корнилова З., Лазарев Э. Защита металлов. 1974. Т.10. №3. С. 345-348.
- Ажажа В.М., Гнедая И.Л. Щелочные металлы – получение, свойства, применение. Текст: непосредственный // Вопросы атомной науки и техники. 2006. № 1. С. 184–194.
- Ганиев И.Н., Пархутик П.А., Вахобов А.В., Купрянова И.Ю. Модифицирование силуминов стронцием. Минск: Наука и техника. 1985. 152 с.
- Ганиев И.Н., Каргаполова Т.Б., Махмадуллоев Х.А., Хакдодов М.М. Барий - новый модификатор силуминов // Литейное производство. 2001. №10. С. 6-9.

28. Войтович Р.Ф., Головео Э.И. Высокотемпературное окисление металлов и сплавов. Киев: Наукова думка, 1980. 292 с.
29. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1968. 428 с.
30. Лепинских В.М., Киселев В.И. Об окислении жидких металлов и сплавов из газовой фазы // Известия АН СССР. Металлы. 1974. № 5. С. 51-54.
31. Ганиев И.Н., Зокиров Ф.Ш., Файзуллоев Р.Дж., Махмадизода М.М. Влияние стронция на кинетику окисления алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1, в твердом состоянии // Журнал Перспективные материалы. №5. 2024. С. 37-47.
32. Зокиров Ф.Ш., Ганиев И.Н., Сангов М.М., Бердиев А.Э., Кинетика окисления алюминиевого сплава АК12М2, модифицированного барием, в твердом состоянии // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2020. № 55 (81). С. 28-33.
33. Ганиев И.Н., Файзуллоев Р.Дж., Зокиров Ф.Ш., Махмадизода М.М. Кинетика окисления алюминиевого проводникового сплава AlTi0.1 с кальцием в твердом состоянии // Журнал физической химии. 2024. Т.97. №1. С. 81-89.
34. Зокиров Ф.Ш., Ганиев И.Н., Ганиева Н.И., Сангов М.М. Влияние кальция на кинетику окисления сплава АК12М2 в твердом состоянии // Вестник Таджикского национального университета. 2018. № 4. С. 130-138.

МАЪЛУМОТ ОИД БА МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ- INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Зокиров Фуркатшоҳ Шахриерович	Зокиров Фуркатшоҳ Шахриерович	Zokirov Furkatshoh Shakhriyevovich
Н.и.т., дотсент	К.т.н., доцент	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi
E-mail: Zokirov090514@mail.ru		
TJ	RU	EN
Ганиев Изатулло Наврузович	Ганиев Изатулло Наврузович	Ganiev Izatullo Navruzovich
Академики АМИТ, доктори илмҳои химия, профессори кафедраи «Технологияи истеҳсолоти химиявӣ»	Академик НАНТ, доктор химических наук, профессор кафедры «Технология химических производств»	Academician of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Doctor of Chemical Sciences, Professor of Department of "Technology of chemical production"
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi
E-mail: ganievizatullo48@gmail.com		
TJ	RU	EN
Рахматуллоева Гулноза Мухриевна	Рахматуллоева Гулноза Мухриевна	Rakhmatulloeva Gulnoza Mukhriyeva
Ходими калони илмӣ	Старший научный сотрудник	Senior researcher
Маркази тадқиқоти технологияҳои инноватсионии Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон	Центр по исследованию инновационных технологий Национальной академии наук Таджикистана	Center for Research of Innovative Technologies of the National Academy of Sciences of Tajikistan
E-mail: Golnoz.86@mail.ru		
TJ	RU	EN
Махмадизода Муродали Махмади	Махмадизода Муродали Махмади	Mahmadizoda Murodali Mahmadi
Д.и.т., дотсент	Д.т.н., доцент	Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik Technical University named after acad. M.S. Osimi
E-mail: Sangov@mail.ru		