

УДК 546.543.261

К ВОПРОСУ О ПРЯМОМ ПРЕВРАЩЕНИИ ХИМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРИ СГОРАНИИ ТОНКОГО ТРЕХСЛОЙНОГО ЗАРЯДА

В. Ю. Баринов¹, Д. Ю. Ковалёв¹, С. Г. Вадченко¹, О. А. Голосова¹,
В. В. Просянюк², И. С. Суворов², С. В. Гильберт²

¹Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мерджанова РАН
142432 Черногловка, barinov@ism.ac.ru

²НИИ прикладной химии, 141313 Сергиев Посад

Проведено исследование прямого преобразования химической энергии в электрическую при сгорании тонкой трехслойной энергетической конденсированной системы $(80\text{Zr} + 20\text{CuO})-(\text{LiF} + \text{CaF}_2 + \text{MgF}_2)-(15\text{Zr} + 85\text{CuO})$, представляющей собой высокотемпературный гальванический элемент. Установлено, что такой элемент при сгорании генерирует электрический сигнал амплитудой 1.6 В и длительностью по полуширине 15 с. Предложен механизм его возникновения. Методом времяразрешающей рентгеновской дифракции проведена идентификация образующихся фаз.

Ключевые слова: горение, ЭДС горения, энергетические конденсированные системы, высокотемпературный гальванический элемент.

DOI 10.15372/FGV20190607

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–3] впервые был обнаружен эффект генерирования электрического импульса при сгорании зарядов из энергетических конденсированных систем в металлической оболочке и при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС). Это явление (ЭДС горения) экспериментально подтвердило принципиальную возможность прямого преобразования незначительной части химической энергии композиций из энергетических конденсированных систем в электрическую энергию в режиме горения. Установлено три типа сигнала ЭДС: положительный, отрицательный и смешанный (как положительный, так и отрицательный). Авторы [1, 2] полагают, что возникновение ЭДС при горении связано с окислительно-восстановительными реакциями, в которых участвуют ионы исходных реагентов и промежуточных продуктов. К настоящему времени опубликован ряд теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию электрических явлений, возникающих в процессе горения зарядов из различ-

ных энергетических конденсированных систем [2, 4–6].

Выявлены закономерности возникновения ЭДС при горении зарядов, содержащих хром, молибден и вольфрам, применяемые для СВС сложных оксидов [7]. Показано, что максимальные значения ЭДС достигают 2 В и зависят от состава исходной шихты. В работе [8] на основе физической модели явления, оценок и сопоставления с экспериментальными данными показано, что возникновение ЭДС обусловлено переносом образующихся в высокотемпературной зоне горения заряженных частиц через поры газообразными продуктами реакции. Опубликованные работы не дают однозначной трактовки механизма возникновения ЭДС в процессе распространения волны горения.

В работе [9] это явление использовано для определения основных параметров горения зарядов из энергетических конденсированных систем в условиях квазиизостатического сжатия, что позволяет проводить интегральную диагностику горения, включая стадии зажигания, распространения волны горения и остывания.

Как следует из перечисленных выше работ, появление ЭДС горения обусловлено высокотемпературными процессами окисления и восстановления компонентов, плавления, испа-

рения, ионизации исходных реагентов и продуктов реакции. При контакте частиц металла и окислителей с ионными расплавами могут протекать высокотемпературные электрохимические реакции с образованием электрических потенциалов и, соответственно, парциальной разности потенциалов. ЭДС горения в этом случае имеет преимущественно электрохимическую природу и может найти практическое применение при условии выполнения сгорающим зарядом функций высокотемпературного гальванического элемента (ВГЭ). Он должен быть многослойным, продукты его сгорания должны содержать избыток металла в одном элементе (аноде) и избыток окислителя в другом (катоде). Контакт между продуктами сгорания электродов должен осуществляться через ионный проводник, т. е. многослойный заряд должен содержать электролитный материал, расплав которого обладает высокой, чисто ионной проводимостью.

В работах [10, 11] установлено, что тонкие двухслойные заряды, электроды которых выполнены из энергетических конденсированных систем на основе циркония, оксида меди, бария хромовокислого и фторида лития, после сгорания выполняют функции ВГЭ. В этом случае продукты сгорания электродов, контактирующие между собой непосредственно, обладают значительной электронной проводимостью (избыток циркония в аноде, медь и оксид одновалентной меди (полупроводник) в катоде). Это приводит к электронному контакту электродов (замыканию) по металлическим продуктам реакций, что уменьшает длительность генерирования электрического сигнала на полуширине до ≈ 1 с.

В данной работе для увеличения времени генерирования электрического сигнала электролитный материал выполнен в виде отдельного элемента (сепаратора) из эвтектической смеси фторидов лития, кальция и магния с добавкой диоксида циркония и размещен между электродами из энергетических конденсированных систем.

Исследование процессов горения тонких многослойных композиций с легкоплавким инертным компонентом, представляющих собой электрохимические системы, является актуальной задачей как для создания батарей ВГЭ (резервных источников тока), так и для получения методом СВС многослойных композитов различного назначения.

Целью данной работы является комплексное экспериментальное исследование макрокинетики горения и фазообразования при сгорании трехслойных зарядов на основе циркония, оксида меди и смеси фторидов лития и щелочно-земельных металлов, сопровождающихся генерированием электрического сигнала.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

ВГЭ представляют собой элементарные электрохимические ячейки, которые образуются при сгорании. Они содержат в продуктах реакции активный металл в аноде, окислитель в катоде и расплавленные фториды (электролит). Продукты сгорания ВГЭ сохраняют размеры и форму исходных образцов, обеспечивая надежность контактов в электрической цепи источника тока.

В исследуемом ВГЭ анод выполнен с избытком Zr (80 % Zr и 20 % CuO по массе) для протекания реакции $Zr + 2CuO = ZrO_2 + 2Cu (+Zr)$; катод выполнен с избытком окислителя (85 % CuO и 15 % Zr) для протекания реакции $Zr + 4CuO = ZrO_2 + 2Cu_2O$. Применение смеси фторидов лития, кальция и магния в эвтектическом соотношении (38.2/23.2/38.6 %) обеспечивает минимальную температуру плавления электролитного материала (674 °С), что уменьшает время активации ВГЭ (достижения максимального значения ЭДС) и увеличивает время генерирования электрического сигнала [12]. Дополнительно в состав электролита был введен диоксид циркония для предотвращения вытекания расплава из ВГЭ и исключения прямого (электронного) контакта продуктов сгорания электродов.

В работе использовали цирконий марки ПЦрК-1 ТУ 48-4-234-84, оксид меди ГОСТ 16539-79, кальций фтористый ТУ 6-09-5335-88, магний фтористый ТУ 6-09-5350-87, литий фтористый ТУ 6-09-3529-84 и барий хромовокислый ТУ 6-09-5286-86. В качестве связующего вещества применяли волокнистый хризотилевоый асбест АХО-2 ТУ 21-22-3-88 с толщиной волокон $0.1 \div 1.0$ мкм и длиной $0.2 \div 4.0$ мм. Площадь удельной поверхности тонкодисперсных порошков оксида меди составляет 0.24 м²/г при среднем размере частиц 4 мкм, совместно измельченных фторидов лития, кальция и магния — 0.7 м²/г при 11 мкм, циркония — 0.2 м²/г при 4 мкм, диоксида цир-

кония — $0.59 \text{ м}^2/\text{г}$ при среднем размере частиц 2 мкм .

Электроды и электролитный элемент для ВГЭ шириной 10 мм и длиной 40 мм вырезали из соответствующей «асбестовой пиротехнической бумаги», которую получали вакуумным осаждением на фильтр-подложку водных взвесей энергетических конденсированных систем с хризотилловым асбестом, имеющим теоретическую формулу $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Применение асбеста в качестве связующего обеспечивает минимальный объем газообразных продуктов горения и возможность формирования тонких электродных элементов ($<1 \text{ мм}$) с достаточной механической прочностью. При этом происходит переплетение волокон асбеста и порошкообразных компонентов с образованием структур, подобной бумаге или тонкому шиферу.

Эксперименты проводили на установке, описанной в работе [11]. ВГЭ, представляющий собой сэндвич из трех разнородных лент, контактирующих между собой без зазора, размещали на основании из нитридоборной керамики. Порядок чередования лент в сэндвиче следующий: катод — электролит — анод. В экспериментах использовали один или два ВГЭ, последовательно соединенных с помощью тонкой стальной пластины (фольги). Иницирование горения ВГЭ осуществляли накаленной нихромовой спиралью. В ходе горения регистрировали возникающий электрический сигнал, который через аналого-цифровой преобразователь записывали в память компьютера. Для этого использовали стальные электроды, расположенные на нижнем и верхнем торцах ВГЭ. Для понимания того, на каких стадиях процесса горения возникает электрический потенциал, а также для измерения скорости горения применяли фотодиоды, которые размещали на верхнем торце образца на расстоянии 20 мм друг от друга. ВГЭ сжимали давлением 6.5 кПа . Температуру горения ВГЭ измеряли термопарами ВР5/ВР20 толщиной 100 мкм .

Регистрацию изменения фазового состава материала в процессе горения проводили методом времяразрешающей рентгеновской дифракции. Сущность метода заключается в получении последовательности рентгенограмм с минимальной временной экспозицией непосредственно в процессе горения [13]. Использовали установку на базе аппарата ДРОН со стандартной рентгеновской трубкой мощностью 2.5 кВт и быстродействующим линейным детектором с

временем экспозиции единичной рентгенограммы от 100 мс . Исследования проводили на монохроматизированном излучении ($\lambda = 1.54187 \text{ \AA}$), в качестве монохроматора использовали пиролитический графит. Применяли горизонтальную съемку на отражение в геометрии Брэгга — Brentano. Ленты ВГЭ размером $30 \times 13 \text{ мм}$ закрепляли в медном держателе, который устанавливали на платформу из нитрида бора. ВГЭ и электродные элементы воспламеняли нихромовой спиралью с торца лент таким образом, чтобы фронт горения распространялся вдоль образца. Монохроматизированный пучок направляли на плоскую поверхность образца в его центральной части под углом $\approx 20^\circ$, и он освещал площадку сечением $2 \times 10 \text{ мм}$. Угловой интервал съемки выбран в пределах $2\theta = 20 \div 70^\circ$, что обеспечивало регистрацию дифракционных линий исходных и образующихся фаз. Экспозиция единичной рентгенограммы составляла 1 с , а их количество в серии — 64 . Эксперименты проводили в воздухе.

Фазовый состав продуктов горения после остывания исследовали методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре ДРОН-3М. Регистрацию дифрактограмм вели в режиме сканирования с шагом съемки 0.02° и временем набора 2 с .

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ. ВРЕМЯРАЗРЕШАЮЩАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИФРАКЦИЯ ГОРЕНИЯ ВГЭ

Рентгенограммы исходных материалов анода, катода и электролита представлены на рис. 1. РФА показал, что состав лент соответствует заложенным соотношениям компонентов, однако наряду с фазой CuO присутствует небольшое количество одновалентного оксида меди, содержащегося в качестве примеси в окислителе. На рентгенограммах анода и катода наблюдаются также слабые дифракционные линии ZrO_2 (моноклинной модификации — $\text{ZrO}_2\text{-}m$), что связано с наличием оксидной пленки на поверхности частиц циркония. В составе электролита, помимо стабильной моноклинной фазы ZrO_2 , присутствует его тетрагональная модификация ($\text{ZrO}_2\text{-}t$).

2.1. Горение катода

Последовательность рентгенограмм при горении ВГЭ с катодом на лицевой поверхности

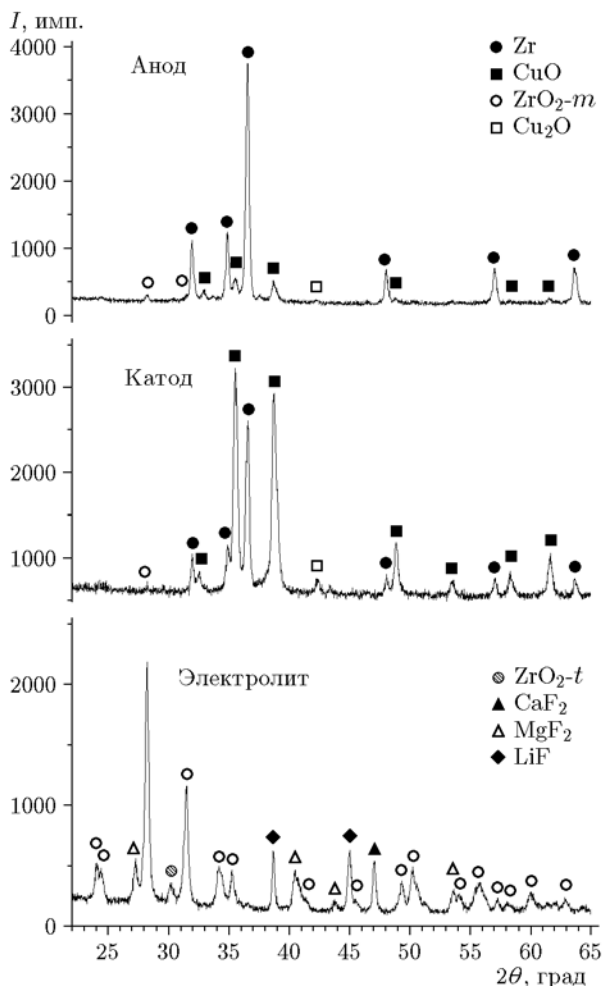


Рис. 1. Рентгенограммы исходных материалов (анод, катод и электролит)

сти образца отображена в виде двумерного поля в координатах угол — время, а интенсивность линии пропорциональна цветовой гамме поля (рис. 2).

Анализ изменения интенсивности дифракционных линий фаз при горении катода показывает, что формирование конечного продукта осуществляется последовательно. В момент прохождения фронта горения через область регистрации рентгенограмм интенсивность дифракционных линий исходных компонентов смеси уменьшается в течение 1 с до уровня фона. Далее на дифракционном поле возникают несколько дифракционных линий, которые идентифицируются как линии фаз β -ZrO₂ и Cu₂O. Угловое положение $2\theta \approx 30.3^\circ$ линии соответствует линии (011) высокотемпературной тетрагональной модификации β -ZrO₂ (PDF card 000-50-1089), стабильной в

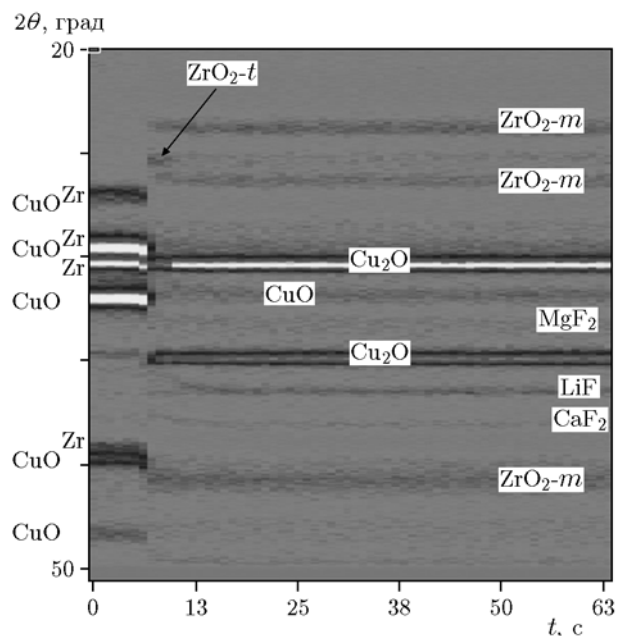
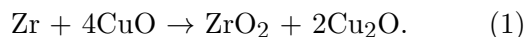


Рис. 2. Последовательность рентгенограмм при горении катода

интервале температуры $1170 \div 2370$ °С. Интенсивность линии β -ZrO₂, максимальная в момент возникновения, в дальнейшем уменьшается и через 3 ÷ 4 с практически сравнивается с фоном, а появляются линии фазы α -ZrO₂ (PDF card 000-37-1484), что, очевидно, обусловлено фазовым переходом $\beta \rightarrow \alpha$ при остывании продуктов сгорания катода. Можно заключить, что фаза ZrO₂ образуется в результате реакции



Подтверждением протекания этой реакции является зарождение и увеличение интенсивности линий фазы Cu₂O в течение 2 ÷ 3 с. После прохождения волны горения на дифракционном поле доминируют линии фаз Cu₂O и α -ZrO₂ (см. рис. 2).

На дифракционном поле после прохождения волны горения остается слабая линия фазы CuO, что свидетельствует о частичном окислении образовавшегося одновалентного оксида меди при горении в воздухе.

Для оценки влияния среды на фазовый состав продуктов сгорания катода были проведены эксперименты по горению катода при разрежении (10^{-3} мбар). Как показал РФА, в этом случае образуется двухфазный продукт: α -ZrO₂ и Cu₂O (рис. 3,а). В то же время при

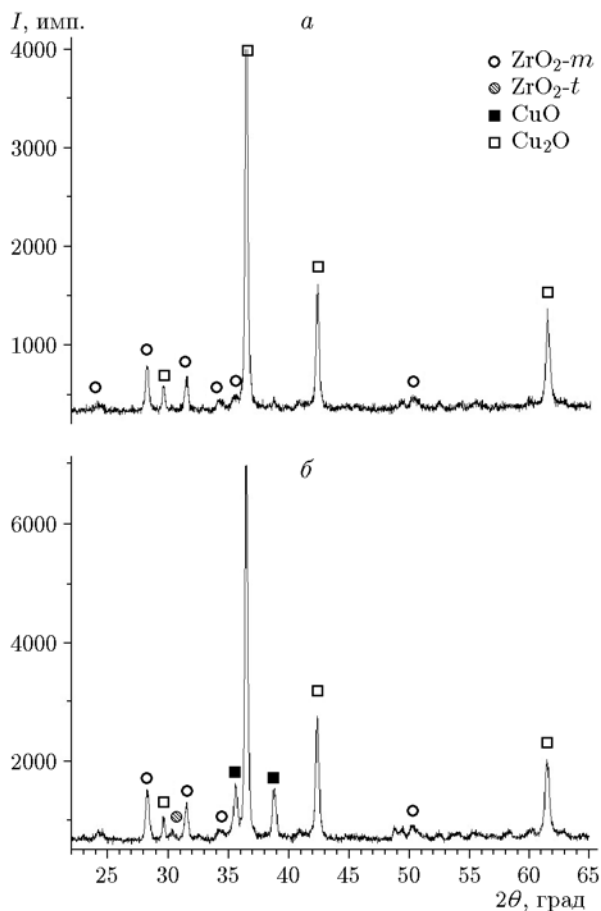


Рис. 3. Рентгенограмма продуктов сгорания катода в вакууме (а) и воздухе (б)

сгорания катода в воздухе на рентгенограмме, помимо дифракционных линий α - ZrO_2 и Cu_2O , наблюдаются слабые линии фазы CuO (рис. 3, б).

Таким образом, при горении катода доминирующей реакцией, отвечающей за распространение волны горения, является восстановление CuO металлическим Zr . В результате образуются преимущественно α - ZrO_2 и Cu_2O .

После прохождения волны горения на дифракционном поле также фиксируются слабые линии фторидных фаз MgF_2 , CaF_2 и LiF , которые образуются при кристаллизации впитавшегося в катод расплава электролита (см. рис. 2). При горении катода в составе ВГЭ происходит капиллярное пропитывание расплавленным электролитом.

2.2. Горение анода

Дифракционная картина, полученная при горении ВГЭ с анодом на лицевой поверхно-

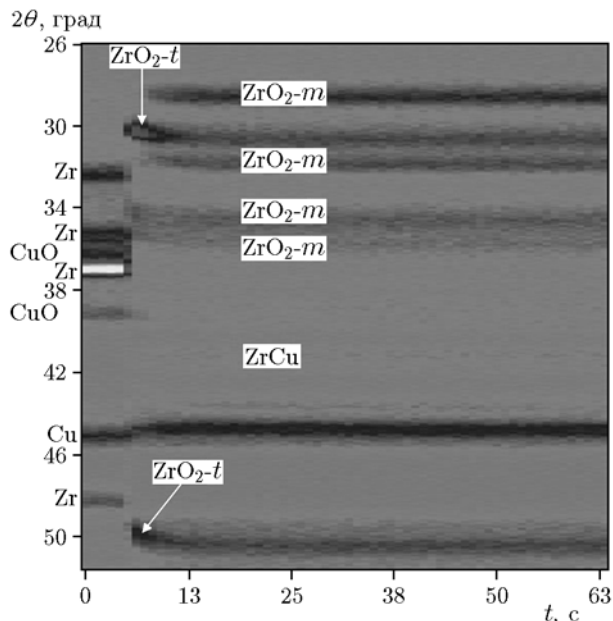
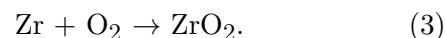
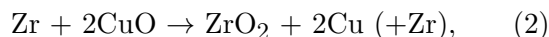


Рис. 4. Последовательность рентгенограмм при горении анода

сти, представлена на рис. 4. До прохождения волны горения присутствуют линии исходных компонентов анода — Zr и CuO , а также линии Cu из-за попадания части рентгеновского пучка на медный держатель ВГЭ. Анализ дифракционной картины при горении анода показывает, что основной фазой, формирующейся при прохождении волны горения, является высокотемпературный β - ZrO_2 , существующий при температуре выше $1170^\circ C$. Линии CuO исчезают в течение 1 с. Интенсивность линий образовавшейся фазы β - ZrO_2 уменьшается в течение $5 \div 6$ с, однако не достигает уровня фона. Одновременно со снижением интенсивности линий β - ZrO_2 появляются линии моноклинной фазы α - ZrO_2 , т. е. происходит фазовый переход $\beta \rightarrow \alpha$ при остывании продуктов горения анода. На дифракционном поле, в отличие от сгоревшего катода, линий фазы Cu_2O не наблюдается, потому что происходит полное восстановление CuO до металла. Принимая во внимание существенный избыток восстановителя Zr в аноде, можно предположить, что во фронте горения параллельно протекают две основные реакции — восстановление оксида меди цирконием и окисление избыточного Zr кислородом воздуха:



Через $4 \div 5$ с после прохождения волны горения на дифракционном поле возникает слабая линия интерметаллидной фазы $ZrCu$, которая образуется при взаимодействии восстановленной Cu с избыточным Zr .

Вследствие небольшой глубины проникновения рентгеновских лучей и анализа преимущественно поверхностного слоя глубиной до 100 мкм, на дифракционном поле доминируют линии фаз $\beta-ZrO_2$ и $\alpha-ZrO_2$ (см. рис. 4). Однако РФА анода после остывания подтвердил, что в составе материала наряду с двумя модификациями ZrO_2 присутствуют интерметаллидные фазы $ZrCu$ (PDF card 000-35-1092) и Zr_7Cu_{10} (PDF card 000-42-1187), а также оксинитрид циркония — продукт взаимодействия с азотом воздуха (рис. 5).

В отличие от катода, после прохождения волны горения фторидные фазы MgF_2 , CaF_2 и LiF на дифракционном поле не фиксируются, что свидетельствует о том, что расплав электролита в условиях эксперимента практически не впитывается в материал анода.

Таким образом, при горении анода во фронте горения протекают параллельные реакции восстановления оксида меди цирконием и окисления избыточного Zr кислородом и азотом воздуха. В остывших продуктах реакции помимо оксидных фаз циркония присутствуют интерметаллидные фазы системы $Cu-Zr$ и оксинитрид $ZrON$, образующиеся через несколь-

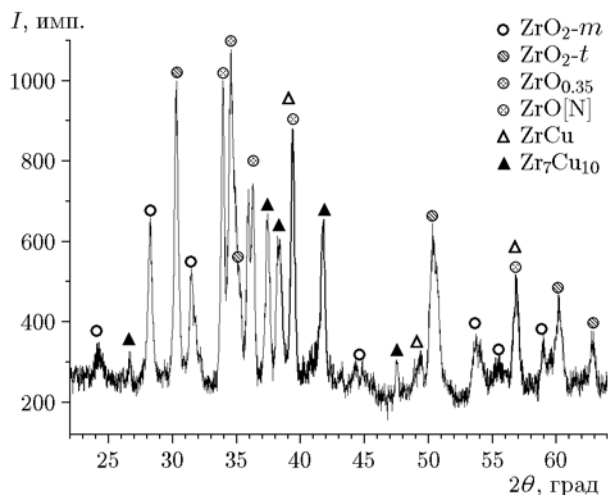


Рис. 5. Рентгенограмма анода после горения в воздухе

ко секунд после прохождения фронта горения.

2.3. Поведение электролита

Дифракционная картина горения ВГЭ представлена на рис. 6 со стороны электролита, расположенного на слое анода. Фазовый состав электролита не меняется в процессе горения ВГЭ. Дифракционные линии $\alpha-ZrO_2$ сохраняются в момент прохождения волны горения. Наблюдается только уменьшение их амплитуды, связанное с влиянием теплового фактора. Следовательно, температура на поверхности не превышает $1170^\circ C$ — температуры фазового перехода $\alpha-ZrO_2 \rightarrow \beta-ZrO_2$. Дифракционные линии LiF практически полностью исчезают в момент прохождения волны горения, что свидетельствует о плавлении электролита (температура плавления фторидной эвтектики $674^\circ C$). При остывании наблюдается зарождение дифракционных линий LiF , причем в момент их возникновения угловое положение сильно смещено в область малых углов. Постепенный сдвиг линий LiF , обусловленный уменьшением температуры, происходит в течение $5 \div 6$ с.

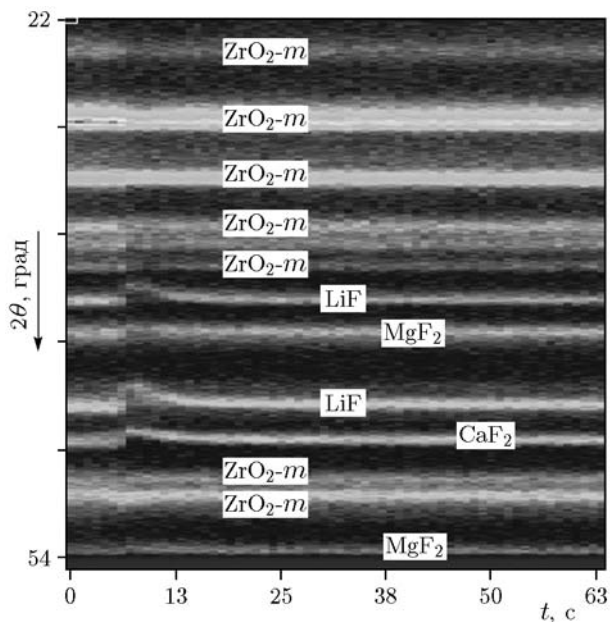


Рис. 6. Последовательность рентгенограмм при горении ВГЭ с электролитом на поверхности

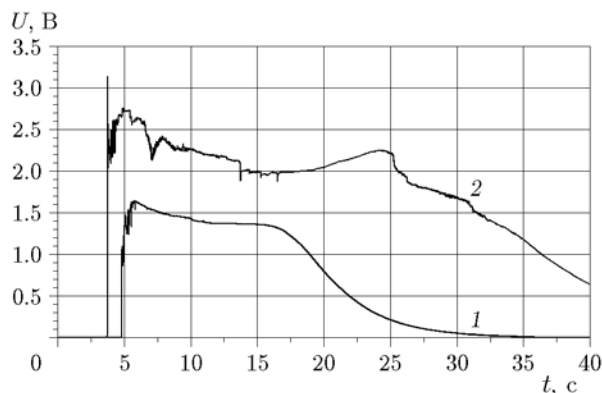


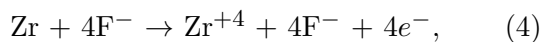
Рис. 7. Типичный вид электрического сигнала, возникающего при горении одного ВГЭ (1) и двух последовательно соединенных ВГЭ (2)

2.4. Возникновение электрического сигнала при горении ВГЭ

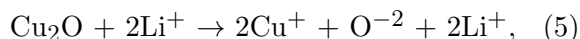
Скорость горения ВГЭ составила ≈ 26 мм/с, средняя температура горения ≈ 1100 °С. При их сгорании происходит генерирование электрических сигналов, типичный вид которых представлен на рис. 7 (от одного ВГЭ (1) и двух последовательно соединенных ВГЭ (2)). Экспериментально подтверждено, что электрический сигнал возникает сразу после воспламенения ВГЭ и плавления электролитного материала в зоне горения и продолжается до остывания продуктов сгорания (до кристаллизации электролита). ВГЭ генерирует электрический сигнал с амплитудой ≈ 1.6 В и длительностью импульса по полуширине ≈ 15 с. При горении двух последовательно соединенных ВГЭ указанные параметры увеличиваются примерно в два раза.

Установлено, что генерирование электрического сигнала происходит при одновременном взаимодействии продуктов сгорания электродов с расплавленным электролитом [6]. Закономерности основных высокотемпературных электрохимических процессов в тонких ВГЭ можно выразить следующими сопряженными электродными реакциями:

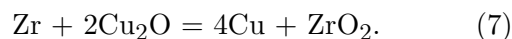
анод:



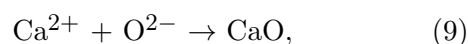
катод:



Суммарную реакцию можно представить следующим образом:



При генерировании электрического сигнала в электролитный расплав непрерывно поступают с анода ионы циркония, а с катода — ионы кислорода. Возникают градиенты концентраций ионов, обеспечивающие их диффузию от электрода к электроду. Значительному увеличению концентрации ионов циркония в электролитном расплаве препятствует поступление в электролит отрицательных ионов кислорода из оксидного катода. При этом следует ожидать образования в расплаве тугоплавких оксидов циркония, кальция и магния по реакциям:



Появление этих соединений ограничивает возможность вытекания расплава, так как это равнозначно введению тугоплавких «загустителей». С другой стороны, связывание ионов кальция и магния в тугоплавкие соединения нарушает эвтектическое соотношение фторидных солей, ведет к росту температуры плавления электролита и уменьшает время генерирования электрического сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально установлено, что при горении тонких трехслойных зарядов, выполняющих функции ВГЭ, происходит генерирование электрического тока (сигнала ЭДС) с амплитудой 1.6 В и длительностью ≈ 15 с. Он возникает после воспламенения заряда и плавления электролитного материала в зоне горения и существует до кристаллизации электролитного расплава. При последовательном соединении двух ВГЭ амплитуда и длительность электрического сигнала (ЭДС) увеличиваются примерно в два раза.

Методом времяразрешающей рентгеновской дифракции установлено, что реакцией, отвечающей за распространение волны горения в катоде, является восстановление CuO металлическим Zr с образованием преимущественно двухфазного продукта $\alpha\text{-ZrO}_2$ и Cu_2O . В

процессе горения ВГЭ происходит капиллярное пропитывание электродов расплавом фторидного электролита. При сгорании анода в воздухе протекают параллельные реакции восстановления оксида меди цирконием и окисления избыточного Zr кислородом и азотом воздуха, поэтому в продуктах реакции помимо оксидных фаз циркония обнаружены интерметаллидные фазы системы Cu—Zr и оксинитрид циркония.

ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов Ю. Г., Кузнецов М. В., Нерсесян М. Д., Мержанов А. Г. Электрoхимические явления в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Докл. РАН. — 1996. — Т. 351, № 6. — С. 780–782.
2. Morozov Yu. G., Kuznetsov M. V., Merzhanov A. G. Electric fields in the processes of self-propagating high-temperature synthesis // Int. J. SHS. — 1997. — V. 6, N 1. — P. 1–13.
3. Демьяненко Д. Б., Дудырев А. С. О природе электродвижущих сил, возникающих при горении пиротехнической смеси карбида циркония с нитратом натрия в металлической оболочке с осевым электродом // Информ. бюл. АН СССР «Прямое преобразование различных видов энергии в электрическую». — 1984. — № 5 (121). — С. 94–100.
4. Кирдяшкин А. М., Поляков В. П., Максимов Ю. М., Корогодов В. С. Особенности электрических явлений в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 2. — С. 61–67.
5. Филимонов И. А., Кидин Н. И. Высокотемпературный синтез горением: генерация внутренних и воздействие внешних электромагнитных полей // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41, № 6. — С. 34–53.
6. Демьяненко Д. Б., Дудырев А. С., Егоров И. М. Механизм возникновения электрических потенциалов в конденсированной фазе при горении системы горючее — окислитель // Материалы III Всерос. юбилейной конф. «Современные проблемы пиротехники» (20–22 октября 2004 г.). — Сергиев Посад: ИИЦ «Весь Сергиев Посад», 2005.
7. Морозов Ю. Г., Кузнецов М. В., Белоусова О. В. Генерация электрических потенциалов при гетерогенном горении в системах, содержащих химические элементы VI группы // Хим. физика. — 2009. — Т. 28, № 10. — С. 58–64.
8. Смоляков В. К., Кирдяшкин А. И., Максимов Ю. М. О конвективном механизме возникновения ЭДС при горении гетерогенных конденсированных систем // Вычислит. технологии. — 2001. — Т. 6, ч. 2. — С. 358–362.
9. Щербаков В. А., Баринов В. Ю. Измерение термоЭДС и определение параметров горения смеси 5Ti + 3Si в условиях квазиизостатического сжатия // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 2. — С. 39–46.
10. Полетаев А. В., Ковалев Д. Ю., Алымов М. И. и др. Экспериментальное исследование электрических и оптических явлений, возникающих в процессе горения двухслойных энергетических конденсированных систем (Zr + CuO + LiF)—(Zr + BaCrO₄ + LiF) // Перспективные материалы. — 2015. — № 3. — С. 72–78.
11. Полетаев А. В., Алымов М. И., Вадченко С. Г. Физические процессы при горении энергетических конденсированных систем (Zr + CuO + LiF)—(Zr + BaCrO₄ + LiF) // Материалы VII Всерос. конф. «Энергетические конденсированные системы» (17–19.12.2014 г.). — Черноголовка; Дзержинский, 2014.
12. Справочник по электрохимии / под ред. А. М. Сухотина. — Л.: Химия, 1981. — Табл. 13.7, с. 457.
13. Ponomarev V. L., Kovalev D. Yu. Time-resolved X-ray diffraction during combustion in the Ti—C—B system // Int. J. SHS. — 2005. — V. 14, N 2. — P. 111–117.

Поступила в редакцию 20.08.2018.

После доработки 04.12.2018.

Принята к публикации 26.12.2018.