

УДК 662.1 : 621.35

Пиротехнические источники тока — новый класс устройств резервной электроэнергетики

В. В. Просянюк, И. С. Суворов, Г. И. Сигейкин, А. В. Куликов

ВЯЧЕСЛАВ ВАСИЛЬЕВИЧ ПРОСЯНЮК — кандидат технических наук, начальник отдела ФГУП «ФНПЦ «НИИ прикладной химии». Область научных интересов: пиротехнические источники электрического тока, устройства и системы пиротехнической автоматики.

ИВАН СТЕПАНОВИЧ СУВОРОВ — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГУП «ФНПЦ «НИИ прикладной химии». Область научных интересов: малогазовые пиротехнические составы и технология формирования зарядов на их основе для пиротехнических источников электрического тока, устройств и систем пиротехнической автоматики.

ГЕННАДИЙ ИВАНОВИЧ СИГЕЙКИН — доктор химических наук, директор Межведомственного центра аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме РАН (МЦАИ РАН). Область научных интересов: электрохимические системы в процессах получения энергии.

АЛЕКСАНДР ВЕНИАМИНОВИЧ КУЛИКОВ — кандидат технических наук, МЦАИ РАН. Область научных интересов: теоретические и прикладные проблемы использования нетрадиционных методов преобразования энергии.

141300 Московская область, Сергиев Посад, ул. акад. Силина, 3, ФНПЦ «НИИ прикладной химии», тел. (496)548-09-71.

119333 Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, МЦАИ РАН, тел./факс (495)135-20-58, (495)135-88-25, E-mail mzairan@ipiran.ru

Введение

В технических средствах, используемых в экстремальных условиях, все более широкое применение находят резервные химические источники электрического тока. Приведение их в действие, например, заливкой электролита (ампульные источники тока) или разогревом электрохимических элементов до плавления электролита (разогревные, или тепловые, источники тока) осуществляют только при возникновении необходимости и непосредственно перед использованием.

По габаритно-массовым характеристикам и времени приведения в рабочее состояние разогревные источники тока существенно превосходят ампульные. Разогревные источники тока представляют собой блок последовательно или параллельно-последовательно соединенных электрохимических элементов, между которыми размещены пиротехнические нагревательные элементы — пиронагреватели. За счет тепла, выделяемого при их сгорании, электрохимические элементы разогреваются до температуры, обеспечивающей плавление в них электролита и приведение в действие источника тока. По сравнению с традиционными пиротехническими зарядами горение тонких пиронагревателей ($1,0 \pm 0,5$ мм) имеет ряд существенных особенностей, обусловленных в частности тем, что их толщина меньше критического диаметра абсолютного большинства зарядов пиротехнических составов.

Себестоимость разогревных химических источников тока высокая из-за дорогих компонентов и материалов, ручной сборки в производственных помеще-

ниях с кондиционированной атмосферой и т.д. Кроме того, им присущ ряд существенных недостатков: отсутствует взаимозаменяемость, нет связи с огневой цепью (единственный способ приведения в действие — от воспламенителей, размещенных внутри изделий), неудовлетворительная работоспособность при высоких тангенциальных перегрузках и др. Малогабаритные ампульные источники еще менее универсальны и неудовлетворительно работают при отрицательных температурах [1].

Принципиальная возможность прямого преобразования химической энергии пиротехнических составов в электрическую энергию в режиме горения показана Д.Б. Демьяненко и А.С. Дудыревым [2].

В ФГУП «ФНПЦ «НИИ прикладной химии» впервые были разработаны инженерные решения по созданию резервных пиротехнических источников (генераторов) тока (ПИТ) на основе малогазовых пиротехнических составов. Эта задача была решена благодаря уникальной способности зарядов из малогазовых пиротехнических составов устойчиво гореть в инертной среде при значительном избытке горючего или окислителя, при малых диаметрах зарядов (до 2–3 мм) и в тонком слое (до 0,3–0,5 мм). Заряды из малогазовых пиротехнических составов надежно воспламеняются и полностью сгорают как в адиабатических условиях, так и при интенсивном отводе тепла (между металлическими пластинами), при температурах от -60 °С до $+60$ °С, при пористости состава менее 30% и более 60–70%. Они допускают введение значительного количества добавок, продукты их сгорания могут быть проводниками, полупроводниками и изоляторами.

Для электродов ПИТ и сепаратора (электролитоносителя) разработаны специальные рецептуры с избытком горючего — для анода, с избытком окислителя — для катода. Электрические характеристики определяются в первую очередь активностью горючего и окислителя в пиротехнических электродах, а также электропроводностью электролитного материала [3].

Сведения о ПИТ в доступных зарубежных источниках нами не обнаружены. Исключение представляет патент США [4], в котором заявлена тепловая батарея, состоящая из высокотемпературных гальванических элементов и пиронагревателей (анод из лития, катод из сульфида железа, электролит — легкоплавкая смесь хлоридов лития и калия). Как вариант электродной конструкции предложен анод, изготавливаемый из смеси металлического лития и фторированного полимера, способный функционировать и как анод, и как источник тепла. Тепловую батарею с таким анодом можно условно отнести к пиротехническим источникам тока.

Особенности устройства и функционирования пиротехнических источников тока

ПИТ является резервным первичным высокотемпературным гальваническим элементом, электроды и сепаратор которого выполнены из пиротехнических составов. Электролит (соль или смесь солей) введен в сепаратор или непосредственно в электроды. Вместе с тем по конструкции и механизму действия ПИТ представляет собой многослойное пиротехническое устройство, в котором химическая энергия пиротехниче-

ского состава преобразуется в электрическую в процессе сгорания.

Специфика работы ПИТ заключается в том, что его быстродействие (время выхода на режим), надежность функционирования, выходные параметры и т.д. зависят от вероятности воспламенения, скорости горения и полноты сгорания пиротехнических элементов. Оптимальные условия для протекания электрохимических реакций, определяющих длительность работы источника тока, абсолютные значения и стабильность электрических характеристик, не могут гарантировать требуемых показателей по воспламенению и сгоранию пиротехнических зарядов. Обеспечение условий, в которых осуществляется устойчивое протекание обоих процессов в течение заданного времени, возможно в случае нахождения определенного компромисса (в отношении рецептур электродов).

Применение в качестве электролита солей, являющихся диэлектриками, обеспечивает термодинамическую устойчивость электрохимической системы в герметичных изделиях (отсутствует саморазряд), благодаря чему достигается длительный срок службы ПИТ. Высокая чувствительность электродов к тепловому инициирующему импульсу гарантирует надежность функционирования изделий и воспроизводимость характеристик. Высокая рабочая температура и использование активных горючего и окислителей позволяют получать значительные рабочие напряжения и плотности тока, при работе как в непрерывном, так и в импульсном режимах (в течение минут и секунд, со-

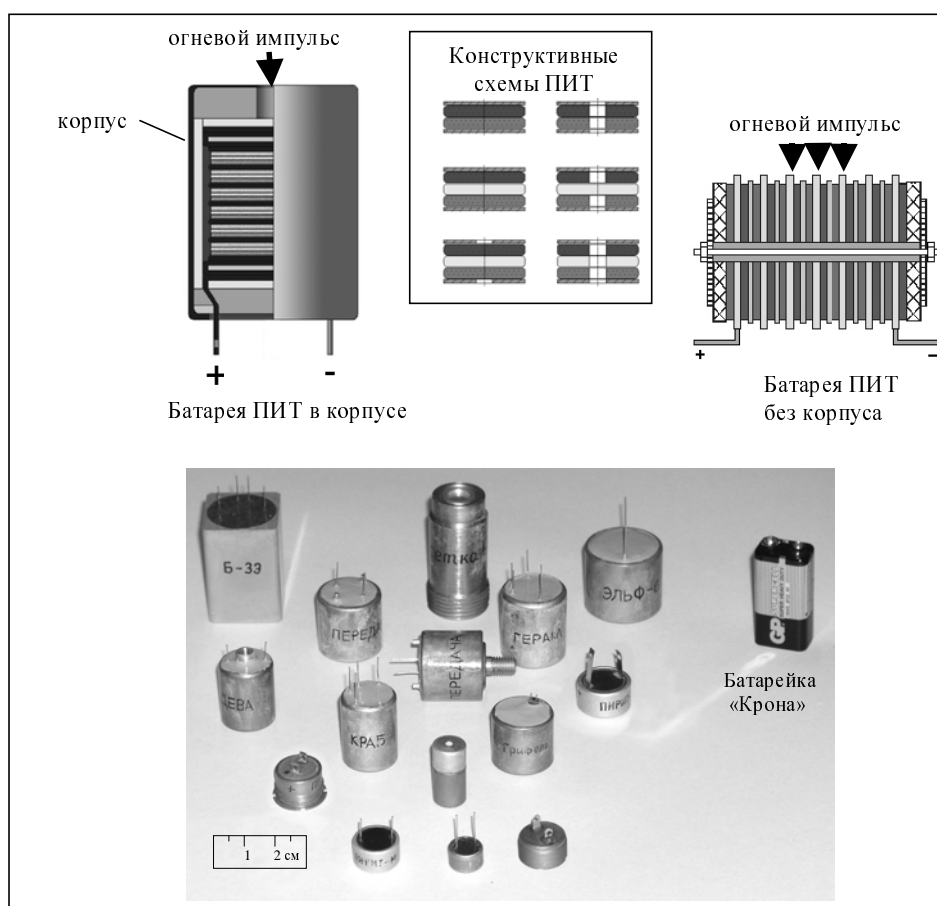


Рис. 1. Конструктивные схемы и внешний вид пиротехнических источников тока

Таблица 1

Характеристики импульсных пиротехнических источников тока (нагрузка 4 Ом)

Наименование источника	Диаметр, мм	Высота, мм	Напряжение*, В	Ток*, А	Средство (способ) приведения в действие
ПГЭТ	M20×0,75	10	6	1,5	Луч огня
ПИРИТ	24,5	14	10	2,5	То же
ПГЭТ-К	19	10	6	1,5	—“—
УТПИ	42	65	40	10,0	Электровоспламенитель

* Максимальное значение.

Таблица 2

Характеристики пиротехнических источников тока, работающих в длительном режиме

Наименование источника	Диаметр, мм	Высота, мм	Время работы, с	Напряжение*, В	Ток*, А	Средство (способ) приведения в действие
ПИТ-1Э	24,5	30,0	25	15	0,05	Электровоспламенитель
ПИТ-2К	26,7	24,0	10	12	0,12	Капсюль-воспламенитель
ПИТ-3Э	30,0	32,0	60	17,5	0,07	Электровоспламенитель
ПИТ-4	30,0	28,0	7	7	6	Луч огня
ПИТ-5	14,0	15,0	10	10	0,01	То же
ПИТ-6	37,5	31,0	300	6	0,006	—“—
ПИТ-7К	24,5	30,0	60	17,5	0,07	Капсюль-воспламенитель
ПИТ-8	24,5	50,0	90	17,5	0,07	Луч огня
БИТ	24,5	45,0	100	24	2,0	То же
БПА-20	70,0	100,0	900	21	5,0	Электровоспламенитель

* Минимальное значение.

ответственно). При толщине пиротехнических электродов $1,0 \pm 0,5$ мм можно собирать миниатюрные изделия (батареи ПИТ) с высокими удельными (объемными и массовыми) характеристиками (рис. 1).

ПИТ могут быть приведены в действие электрическим, механическим и тепловым способами (от воспламенителей всех типов, за счет теплоты продуктов сгорания, внешнего нагрева и т.п.). Это качество их работоспособности дает возможность управлять огневыми и электрическими сигналами (преобразовывать огневые сигналы в электрические и наоборот).

ПИТ можно использовать в качестве универсальных источников электрического питания во время работы экспедиций, передвижных лабораторий, при ликвидации последствий катастроф и стихийных бедствий, для энергообеспечения бортовых приборов и устройств, средств оповещения о пожарах и в других чрезвычайных ситуациях. Системы на основе ПИТ могут включать электрические и электромеханические устройства, элементы электроники и все известные пиротехнические изделия.

По длительности работы ПИТ можно условно разделить на импульсные (функционирование до 1 с) и работающие в длительном режиме (до 10 мин) (табл. 1 и 2). Как показали испытания, работоспособность ПИТ сохраняется после воздействия перегрузок всех видов при температуре от -60 °С до $+60$ °С. Эти источники тока не требуют регламентных проверок и обслуживания в течение всего гарантийного срока службы (не менее 20 лет), их можно изготавливать на имеющемся

оборудовании заводов отрасли без существенного изменения технологии. Научная новизна ПИТ подтверждена патентами РФ, золотой медалью всемирного салона изобретений «Брюссель-Эврика-97» и серебряной медалью на выставке в Женеве в 1998 г.

Системы сигнализации, блокировки и защиты на основе ПИТ способны преобразовывать механические, тепловые и другие несанкционированные воздействия в сигналы, воспринимаемые человеком: свечение сигнальных ламп, цифровых панелей, звуковые сигналы (гудок, звонок, сирена) с фиксацией события на бумаге, магнитной ленте и т.д. Они могут включать или отключать соответствующее оборудование и механизмы, приводить в действие огнетушители и другие устройства.

Тепловые, механические и иные датчики, содержащие ПИТ, устанавливают в пожарноохранные средства в качестве источников и усилителей тока, в извещателях, ручных пускателях. Например, электрический автономный датчик может применяться на объектах, предрасположенных к самовозгоранию при перегреве, на складах с огне- и взрывоопасными материалами и в помещениях, где проводятся опасные работы, в качестве самосрабатывающего энергонезависимого сигнально-пускового прибора для включения различного рода исполнительных устройств. При превышении температуры допустимого значения чувствительный элемент датчика снимает с предохранения капсюль-воспламенитель и ПИТ придет в действие.

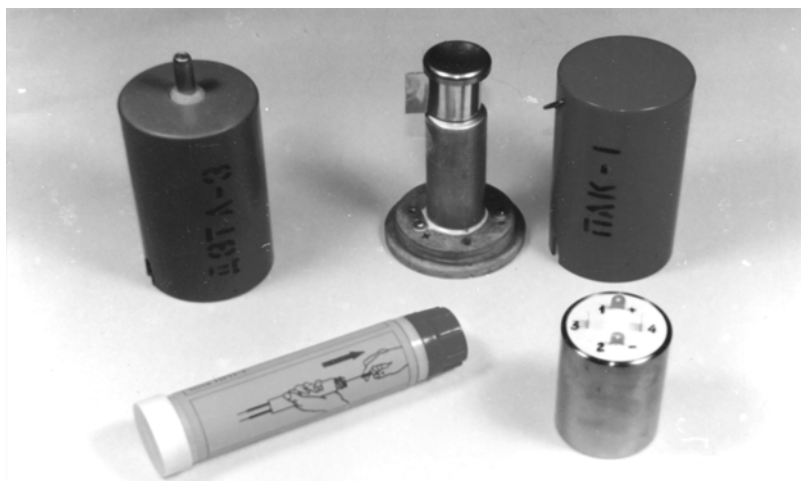


Рис. 2. Автономные устройства с пиротехническими источниками тока

Аналогично назначение автономного кнопочного пускателя, используемого в качестве самостоятельного или дублирующего устройства для дистанционного командного приведения в действие стационарных порошковых или аэрозольных огнетушителей и т.п. (рис. 2). Противопожарная автоматическая система сигнализации состоит из электрических тепловых автономных датчиков и пульта оповещения со световой и звуковой сигнализацией. При превышении в защищаемом помещении порогового значения температуры автоматически срабатывает ближайший к очагу пожара тепловой датчик и ПИТ генерирует электрический ток для включения пульта оповещения и передачи сигнала в пожарную охрану [5, 6].

ПИТ являются основой для разработки резервных источников электрической энергии нового поколения (нового класса источников питания). Например, они могут приводить в действие разогревные источники тока большой емкости. Эти «гибридные» источники тока сочетают достоинства тепловых химических, в том числе литиевых источников, и ПИТ (генерирование электрического тока в несколько ампер в течение 10–20 мин). Для них характерны малое время активации, универсальность приведения в действие и т.п. Реализация данной конструкторской схемы устройств уже начата в НИИ прикладной химии. Их характеристики приведены в табл. 2 (изделия БИТ и БПА-20).

ПИТ с накопителями электрической энергии – конденсаторами и ионисторами (электрохимическими конденсаторами) [1, 7] – могут найти применение для пуска и питания слаботочных приборов и систем, предназначенных для работы в экстремальных ситуациях, в течение нескольких часов при выходе из строя штатных источников питания, а также обеспечивать работу устройств, для пуска которых необходимы импульсы электрического тока до 10 кА. Незначительное внутреннее сопротивление ПИТ позволяет заряжать низковольтные и высоковольтные конденсаторы большой емкости (до единиц фарад) непосредственно или с применением высоковольтных преобразователей напряжения. Для быстрой зарядки низковольтных (большой емкости) конденсаторов наиболее предпочтительны импульсные ПИТ большой мощности, обеспечивающие заряд при заданном напряжении в режи-

ме короткого замыкания. Экспериментально подтверждено, что ПИТ импульсного действия (ПИРИТ) передает при зарядке низковольтного конденсатора не менее 70% своей удельной энергии, что свидетельствует о высокой эффективности разрабатываемых устройств и возможности их миниатюризации.

Для зарядки высоковольтных конденсаторов необходимы ПИТ с высоким напряжением или снабженные преобразователями напряжения. При сокращении времени работы преобразователя в активном режиме за счет применения технических средств и оптимизации его параметров (путем подбора частоты генератора) достигается более эффективное и экономичное использование энергии ПИТ. Если зарядку низковольтных конденсаторов можно осуществить с помощью импульсных

ПИТ, то для зарядки ионисторов и высоковольтных конденсаторов необходимы ПИТ длительного действия (с подключением преобразователя напряжения).

Тепло, выделяющееся в значительном количестве на первом этапе работы ПИТ, обеспечивает работоспособность ионисторов при температуре окружающей среды до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (их нижний температурный предел составляет от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Потенциальные возможности ПИТ реализованы далеко не в полной мере. Новые пути существенного улучшения их технических характеристик могут дать выявление и учет особенностей механизмов воспламенения, горения и генерирования тока, что открывает также возможности целенаправленного совершенствования этих устройств и разработки новых конструкторских схем батарей ПИТ, оптимизации рецептуры и технологии формирования тонких пиротехнических зарядов. Энергоемкость ПИТ несомненно может быть увеличена применением активных материалов и повышением полноты их использования.

Процесс прямого преобразования химической энергии в электрическую в режиме горения представляет собой сложную совокупность превращений, включающих окисление одних и восстановление других компонентов, плавление, испарение, ионизацию исходных реагентов или продуктов реакции. Пиротехнические составы гетерогенны, поэтому элементарные химические реакции протекают преимущественно на границах между фазами, которые могут обладать разными типами проводимости (металлы – электронной, расплавы солей – ионной и т.д.). Это приводит к возникновению разности электрических потенциалов между фронтом горения и конденсированными продуктами реакции – ЭДС горения [8, 9].

Анализ причин возникновения ЭДС горения позволил установить, что необходимым условием функционирования ПИТ является образование в сгорающих многослойных зарядах высокотемпературного (пиротехнического) гальванического элемента. Продукты сгорания этих зарядов должны выполнять функции электродов с высокой электронной проводимостью. Разность потенциалов между ними возникает при взаимодействии их с расплавленным элект-

тролитом, когда осуществляется контакт проводников первого и второго рода. Например, в пиротехническом аноде атомы металлического горючего подвергаются воздействию силовых полей анионов электролитного расплава, что приводит к переходу их в расплав в виде ионов, обмену ионами между электродом и электролитом. В системе устанавливается динамическое равновесие, приводящее к образованию двойного диффузного электрического слоя у поверхности каждого электрода. Скорость обратимого переноса зарядов определяет время достижения равновесного значения потенциала и его устойчивость по отношению к внешним воздействиям. Взаимодействие активных металлов с электролитными (солевыми) расплавами протекает энергично, поэтому поляризация таких электродов с практически используемыми плотностями тока (до 10 А/см²) сопряжена в основном только с концентрационными затруднениями.

Скачок потенциала на границе металл—электролит при прочих равных условиях возрастает при переходе от амфотерных элементов к щелочным металлам. Активные металлы обеспечивают более высокую разность потенциалов между фазами. На величину электродных потенциалов металлов в расплавленных солях оказывают влияние также температура процесса и свойства электролита. ЭДС и соответственно напряжение, удельные мощность и энергия источника тока возрастают с увеличением потенциала окислителя (катода) в сторону положительных значений, а с увеличением потенциала восстановителя (анода) — в сторону отрицательных значений. Удельная энергия растет с увеличением удельной емкости и снижением электрохимических эквивалентов окислителя и восстановителя, т.е. зависит от скоростей их электрохимического превращения на электродах. Целесообразность использования того или иного реагента может определяться также их стоимостью, доступностью и т.п.

Если в качестве анодных материалов в тепловых источниках тока обычно применяют чистые металлы — кальций, магний, литий, натрий, а также двойные и многокомпонентные сплавы и композиционные материалы на основе лития и кальция [1], то в пиротехнические аноды обычно вводят избыточное количество циркония в виде тонкодисперсного порошка. Цирконий имеет достаточно высокий анодный потенциал, обеспечивает устойчивое горение пиротехнических элементов толщиной до 0,3—0,5 мм, с различным заполнением промежутков между металлическими токоотводами, в температурных условиях от –60 °С до + 60 °С. Отработана безопасная и высокопроизводительная технология формования тонких пиротехнических электродов.

Катодные материалы должны обладать следующими свойствами: высоким положительным потенциалом, коррозионной стойкостью и термической устойчивостью по отношению к расплавленным электролитам, малыми электродной поляризацией и омическим сопротивлением, низкой растворимостью в электролите, а также доступностью и дешевизной. Этим требованиям соответствуют оксиды, сульфиды и галогениды металлов.

В качестве примера рассмотрим пиротехнические катоды на основе оксида меди. По электрической проводимости оксид меди является диэлектриком. Для обеспечения электропроводности, повышения и ста-

билизации разрядного напряжения в катодную массу добавляют электролитный материал, за счет этого увеличивается площадь контакта активного вещества и электролита и уменьшается поляризация. Их оптимальные соотношения позволяют получить максимальные характеристики ПИТ.

Для создания ионной проводимости между электродами необходим ионный проводник (проводник второго рода)—расплавленные соли, основания и стекла, твердые электролиты с чисто ионной высокой проводимостью, низким давлением паров и малой коррозионной активностью по отношению к электродам и конструкционным элементам (совместимостью) при высокой рабочей температуре. Для ПИТ требуется максимально легкоплавкий электролит с высокими значениями электропроводности, напряжения электролитического разложения, химической и термической устойчивостью при хранении в контакте с восстановителем и окислителем, он должен быть недорогим и недефицитным. Этим условиям соответствуют соли галогеноводородных кислот. Соли, горючее и окислители, используемые для изготовления тонких электродных и других элементов ПИТ методом вакуумного осаждения водной взвеси компонентов, должны быть нерастворимы в воде и не гигроскопичны. Для исключения возможности вытекания расплавов при перегрузках в электролит вводят загустители (связки). Эту роль выполняет асбест с добавкой порошков тугоплавких неорганических соединений.

Электрохимические процессы в пиротехнических источниках тока

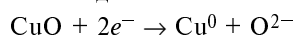
Процессы горения в ПИТ протекают параллельно с электрохимическими реакциями, что достигается при следующих условиях:

— реагенты (окислитель и восстановитель, находящиеся соответственно в катодном и анодном элементах) пространственно разделены между собой, что приводит к разделению электродных реакций;

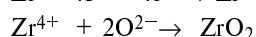
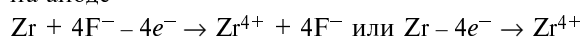
— каждый из электродных элементов контактирует с электролитом или содержит электролитный материал, что обеспечивает протекание электродных реакций и замкнутость электрической цепи. В связи с этим отметим, что простейший ПИТ состоит из двух пиротехнических зарядов (электродов) различной природы, продукты сгорания которых контактируют с общим электролитом, например с расплавом соли [6].

Схему работы ПИТ можно представить следующим образом. На границе положительного электрода (катода) с электролитом образуются ионы кислорода, которые на отрицательном электроде (аноде) вступают в реакцию с ионами восстановителя. Например, в медь-циркониевом пиротехническом источнике тока с фторсодержащим электролитом протекают следующие реакции:

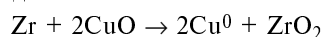
на катоде



на аноде



Суммарная токообразующая реакция может быть представлена так:



Внутреннее сопротивление ПИТ зависит от удельного сопротивления электролита и конструктивного оформления устройства, и оно может изменяться в ходе работы источника в результате изменения состава и температуры электролита. Ускорить электродные реакции можно увеличением истинной площади рабочей поверхности электродов.

Наибольшую проводимость в расплавленном состоянии имеет фторид лития, который незначительно растворяется в воде. Расплавы фторидов бария, стронция и кальция также обладают высокой проводимостью, и эти соли мало растворимы в воде. Поэтому их применяют для формирования электролитных элементов ПИТ (обычно в виде легкоплавких эвтектик).

Удовлетворительные электрические характеристики батарей ПИТ получаются, если в качестве электролитов используются механически перемешанные тонкодисперсные порошки солей в заданном соотношении. Например, эвтектика из смеси фторидов бария, магния и лития имеет температуру плавления 654 °С, что меньше, чем у смеси фторидов кальция, магния и лития (674 °С). Несмотря на более низкую температуру плавления первой композиции, предпочтительнее вторая ввиду более высокой проводимости расплава, обеспечивающей меньшее внутреннее сопротивление ПИТ.

В качестве электролитного материала могут быть использованы также тонкодисперсные порошки гексафторсилicates натрия и калия, криолита, безводных силикатов щелочных металлов и т.д. Однако напряжение соответствующих ПИТ меньше при прочих равных условиях, чем у рассмотренных выше изделий на 10—20% [10—13].

Воспламенение и сгорание пиротехнических электродов

При должном подборе рецептов пиротехнических электродов и технологии их формирования обеспечивается надежное воспламенение ПИТ, сгорание и генерирование тока. Выработка тока возможна при условии введения в электродные элементы не менее 15—20% (масс.) тонкодисперсных порошков электролитных материалов с минимальной температурой плавления и максимальной ионной проводимостью расплавов. При меньших количествах добавки электрические характеристики ПИТ резко снижаются. Это обусловлено преимущественно электронной проводимостью продуктов сгорания электродов и превращением большей части химической энергии в тепловую вследствие протекания экзотермических окислительно-восстановительных реакций в диффузионном режиме.

Электроды ПИТ, как и во всех химических источниках тока, контактируют между собой непосредственно или через электролит (сепаратор). По конструкции и условиям функционирования ПИТ являются многослойными пиронагревателями, выполненными из нескольких тонких зарядов, при сгорании которых экзотермические химические и электрохимические процессы продолжают до остывания продуктов реакции. Механизмы этих процессов, протекающих в ПИТ, практически не изучены. Сложность связана с тем, что толщина ПИТ составляет порядка 1 мм, они сгорают между металлическими пластинами (токовододами) и состоят как минимум из двух тонких разнородных зарядов (электродов), каждый из которых в

отдельности в названных условиях горит либо на пределе, либо не способен гореть в стационарном режиме. При сгорании 1 г многослойного заряда после приведения ПИТ в действие интенсивно выделяется (за доли или несколько секунд в зависимости от размеров и рецептуры электродов) до 15—25 кДж тепла. Прохождение фронта горения не означает завершения химических процессов. Продолжаются окислительные и восстановительные реакции между продуктами сгорания электродных пиротехнических зарядов в течение 1—300 с при активном участии расплавленного электролита. Такое протекание процессов обеспечено применением активных горючего и окислителей в виде тонкодисперсных порошков (титан, цирконий, хромат бария, оксид меди, перхлорат калия и т.п.) и оптимальной конструкцией высокотемпературных гальванических (пиротехнических) элементов.

Процесс воспламенения зарядов, содержащих инертный (электролитный) материал, усложнен его плавлением. Дело в том, что тепло, поступающее извне для задействования ПИТ, кроме затрат на нагрев пиротехнического состава расходуется на плавление электролита, и это оказывает влияние на устойчивость зажигания и выход волны горения заряда на установившийся режим [14].

ПИТ содержат значительное количество тонкодисперсных порошков неорганических солей, температура плавления которых ниже температуры горения пиротехнических элементов. Эти добавки снижают тепловой эффект и скорость горения зарядов, могут привести к нестационарности процесса, затруднить воспламенение и т.д.

Как известно [15], высоко- и низкоскоростные волны горения в пиротехнических элементах формируются при инициировании горения соответственно высоко- и низкоэнергетических зарядов. Это обусловлено тем, что при высокотемпературном зажигании фазовый переход инертного компонента совершается быстрее по сравнению с низкотемпературным процессом за счет большей разности температур. В результате стационарный режим горения устанавливается при температурах, близких к адиабатическому значению конечной температуры, и заканчивается формированием волны «слияния». При поджигании низкоэнергетического состава развитие процесса плавления при малой разности температур не успевает за протеканием химической реакции, что приводит к установлению режима «отрыва». Выход на стационарный режим может происходить монотонным или колебательным образом, а на автоколебательный — только в последнем случае. Стабилизирующее действие легкоплавкой электролитной (инертной) добавки возрастает также с уменьшением разницы между температурами плавления инертного материала и горения, что проявляется в снижении частоты и амплитуды колебаний температуры и мгновенной скорости фронта горения. Следует отметить, что названный эффект прямо противоположен действию тугоплавкого инертного разбавителя, всегда приводящего к дестабилизации фронта горения. Влияние фазового перехода инертного компонента (или компонентов) на характер горения сводится в основном к дополнительному тепловыделению при кристаллизации электролита в периоды депрессии или к поглощению избыточного тепла при его плавлении во время горения прогреваемого слоя.

Эти особенности процессов в данном случае связаны в первую очередь с температурой плавления электролитной добавки, ее количеством, отношением теплоты плавления к тепловому эффекту реакции, соотношением скоростей горения заряда и плавления материала.

С момента начала плавления электролитной добавки в зоне реакции появляется мощный «сток» тепла, приводящий к образованию участка почти с постоянной температурой. Процесс плавления начинается, когда температура в выделенном объеме достигает температуры плавления наиболее легкоплавкого компонента. При этом все частицы легкоплавкого вещества в обозначенном объеме практически одновременно претерпевают фазовый переход при постоянной температуре. Согласно закону сохранения энергии системы, температура в объеме в момент плавления частиц не может существенно отличаться от температуры плавления легкоплавкого компонента, так как все подводимое тепло расходуется на плавление. Учитывая, что значительное количество частиц в пиротехнических электродах имеет радиус до 5–10 мкм, можно предположить, что распределение температуры при нагреве частиц удовлетворяет стационарному уравнению теплопроводности [15].

В зависимости от начальной температуры и количества инертной легкоплавкой добавки возможно горение, когда температура будет постоянной и равной температуре плавления добавки (в этом случае говорят о режиме высокотемпературного плавления). Если температура фазового перехода значительно меньше температуры горения, то плавление может осуществиться уже в зоне прогрева [16].

Введение солей (например, галогенидов металлов) по названным выше причинам резко сужает пределы горючести и снижает скорость горения тонких электродов в ПИТ. Особенно заметен этот эффект при сжигании зарядов между металлическими пластинами. В частности, в этих условиях не горят пиротехнические электроды на основе циркония и хрома бари (или оксида меди) при содержании электролита фторида лития более 15–20% по массе (в зависимости от соотношения горючего и окислителя). Тонкие пиротехнические электроды устойчиво горят между металлическими пластинами в достаточно узких концентрационных пределах. Скорость их горения при толщине, превышающей критическое значение, мало зависит от степени сжатия пластин.

Заключение

В ФГУП «ФНПЦ «НИИ прикладной химии» разработаны резервные пиротехнические источники тока нового типа, которые выпускаются серийно. Они могут быть приведены в действие от воспламенителей всех видов: под действием продуктов сгорания, внешним нагревом и т.п. Гарантийный срок их службы в режиме ожидания не менее 20 лет при температуре хранения и эксплуатации от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. ПИТ работоспособны в любой пространственной ориента-

ции при воздействии механических и иных нагрузок. Надежность этих источников тока не менее 0,99 с доверительной вероятностью 0,9. Все эти достоинства позволяют использовать ПИТ в качестве универсальных источников электрического питания, предназначенных прежде всего для обеспечения работы технических средств в экстремальных условиях, в частности для обеспечения автоматического тушения пожаров на стадии возгорания, надежного оповещения о чрезвычайных ситуациях, о проникновении на охраняемые объекты и т.д.

Применение ПИТ в системах пиротехнической автоматики совместно с электрическими и электромеханическими устройствами, элементами микроэлектроники и накопителями энергии дает возможность создавать качественно новые миниатюрные автономные управляющие системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Химические источники тока: Справочник. Под редакцией Н.В. Коровина и А.М. Скундина. М.: изд. МЭИ, 2003, 740 с.
2. Демьяненко Д.Б., Дудырев А.С. Современные проблемы технической химии. Матер. докл. Всеросс. научно-техн. конф. (21–22.11.03). Казань, КГТУ, 2003, с. 130–142.
3. Просянюк В.В., Варных Н.М., Емельянов В.Н. Актуальные проблемы развития автономных информационных и управляющих систем на основе высокоэнергетических конденсированных материалов в XXI веке. IV Всеросс. научно-техн. конф. С.-Пб.: ООО «Книга», 2002, с. 143–146.
4. Патент США № 5731102, H01M 6/36.
5. Просянюк В.В., Варных Н.М., Емельянов В.Н. Современные проблемы пиротехники. Матер. 1 Всеросс. конф. М.: ЦЭИ «Химмаш», 2001, с. 74–75.
6. Просянюк В.В., Варных Н.М., Суворов И.С., Емельянов В.Н. Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук, 2005, № 3 (44), с. 49–55.
7. Нижниковский Е.А. Химические источники автономного электропитания радиоэлектронной аппаратуры. М.: изд. МЭИ, 2004, 228 с.
8. Филимонов И.А., Кидин Н.И. Физика горения вещества, 2005, т. 41, № 6, с. 34–53.
9. Смоляков В.К., Кирдяшкин А.И., Максимов Ю.М. Там же, 2002, т. 38, № 6, с. 76–82.
10. Просянюк В.В., Суворов И.С., Емельянов В.Н. Современные проблемы технической химии. Матер. докл. Всеросс. научно-техн. конф. (21–22.11.03). Казань, КГТУ, 2003, с. 309–311.
11. Просянюк В.В., Суворов И.С., Разживина И.М. Современные проблемы пиротехники. Матер. 2 Всеросс. конф. Сергиев Посад, ИИЦ «Весь Сергиев Посад», 2003, с. 118–120.
12. Просянюк В.В., Суворов И.С. Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук, 2005, № 3 (44), с. 70–74.
13. Просянюк В.В., Суворов И.С. Современные проблемы пиротехники. Матер. 2 Всеросс. конф. Сергиев Посад, ИИЦ «Весь Сергиев Посад», 2005, с. 103–109.
14. Прокофьев В.Г., Смоляков В.К. Физика горения вещества, 2002, т. 38, № 2, с. 21–25.
15. Некрасов Е.А., Тимохин А.М., Пак А.Т. Там же, 1990, т. 26, № 5, с. 79–85.
16. Смоляков В.К. Там же, 2002, т. 38, № 5, с. 78–84.