

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.63>

АНАЛИЗ ОСТАТКОВ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ПОСЛЕ ТЕПЛООВОГО РАЗГОНА МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Научная статья

Мокряк А.В.^{1,*}, Мокряк А.Ю.², Мельник А.А.³

¹ORCID : 0000-0002-6630-4045;

²ORCID : 0000-0001-9857-6435;

³ORCID : 0000-0002-5248-1534;

^{1,2,3} Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ Научно-исследовательский институт перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (mokryakanna[at]mail.ru)

Аннотация

Благодаря ряду преимуществ, таких как малый вес, высокая удельная емкость, хорошее удержание заряда, длительный срок службы и низкая токсичность, литий-ионные аккумуляторы стали предпочтительными устройствами хранения энергии для различных применений, включая портативную электронику, такую как мобильные телефоны, ноутбуки и камеры. Пожары, связанные с литий-ионными аккумуляторами, вызывают много вопросов, касающиеся безопасности литий-ионных аккумуляторов. Поэтому понимание пожарной опасности литий-ионных аккумуляторов важно для обеспечения безопасности при их изготовлении, хранении, транспортировке и использовании. В данной статье приведены результаты исследования методом сканирующей электронной микроскопии остатков литий-ионных аккумуляторных батарей после экспериментального моделирования теплового разгона. Эксплуатация такого типа аккумуляторов зачастую сопровождается пожароопасным явлением теплового разгона, который может стать причиной возникновения пожара. Проблема установления причастности к возникновению горения аварийного режима работы литий-ионных батарей до сих пор является не решенной актуальной задачей в экспертизе пожаров.

Полученные результаты способствуют совершенствованию доказательной базы при экспертизе пожаров, связанных с возгоранием литий-ионных аккумуляторов. Также результаты данной работы могут быть положены в основу разработки методики экспертного исследования литий-ионных аккумуляторных батарей после пожара.

Ключевые слова: литий-ионные аккумуляторы, экспертиза пожаров, пожарная безопасность, тепловой разгон, сканирующая электронная микроскопия, картирование.

AN ANALYSIS OF LITHIUM-ION BATTERY RESIDUES AFTER THERMAL RUNAWAY BY SCANNING ELECTRON MICROSCOPY

Research article

Mokryak A.^{1,*}, Mokryak A.Y.², Melnik A.A.³

¹ORCID : 0000-0002-6630-4045;

²ORCID : 0000-0001-9857-6435;

³ORCID : 0000-0002-5248-1534;

^{1,2,3} Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russian Federation

³ Research Institute for Advanced Studies and Innovative Technologies in the Field of Life Safety, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (mokryakanna[at]mail.ru)

Abstract

A number of advantages such as low weight, high specific capacity, good charge retention, long life and low toxicity have made lithium-ion batteries the preferred energy storage devices for various applications, including portable electronics such as cell phones, laptops and cameras. Fires associated with lithium-ion batteries raise many questions about the safety of lithium-ion batteries. Therefore, understanding the fire hazards of lithium-ion batteries is important to ensure safety in their manufacture, storage, transportation and use. This article presents the results of a scanning electron microscopy study of lithium-ion battery remnants after an experimental simulation of thermal runaway. The operation of this type of battery is often accompanied by a fire-hazardous phenomenon of thermal runaway, which can cause a fire. The problem of determining the involvement of the emergency mode of lithium-ion batteries in the occurrence of fire is still an unsolved current problem in the examination of fires.

The results obtained contribute to improving the evidence base in the examination of fires associated with the ignition of lithium-ion batteries. Also, the results of this work can be used as a basis for the development of methods of expert examination of lithium-ion batteries after a fire.

Keywords: lithium-ion batteries, fire expertise, fire safety, thermal runaway, scanning electron microscopy, mapping.

Введение

В настоящее время литий-ионные аккумуляторные батареи широко распространены в бытовых устройствах и изделиях – от небольших элементов в электронных продуктах до крупномасштабных устройств в электромобилях,

системах хранения энергии. Основная причина такого широкого применения – это оптимальное сочетание плотности энергии, эффективности, срока службы и минимального эффекта памяти. В связи с массовым применением такого рода источников питания, одним из основных аспектов их эксплуатации является пожарная безопасность. К сожалению, практика расследования пожаров показывает, что аварийный режим работы литий-ионных аккумуляторов часто становится причиной возгорания, как на электротранспорте (электромобили, электросамокаты и т.д.), так и в быту, например, в телефонах сотовой связи, ноутбуках. Известно, что литий-ионные батареи имеют внутренний недостаток – с их легко воспламеняющимся электролитом на органической основе, они могут подвергаться тепловому разгону, что приводит к значительному тепловыделению, взрывной разгерметизации внешней металлической оболочки аккумулятора и возникновению флэма пламени, температура которого по некоторым оценкам превышает 1000 °C [1], [3], [5], [7]. Тепловой разгон может быть спровоцирован как внешними факторами – тепловое воздействие, механическое повреждение, так и внутренними – заводской дефект, неправильная эксплуатация, перезаряд.

При таких условиях работы литий-ионной батареи, возникающие тепловые эффекты неизбежно способствуют возникновению и развитию пожара. Ввиду достаточно мощного источника зажигания, такие пожары не только наносят серьёзный материальный ущерб, но и становятся причиной травмирования и гибели людей. В этой связи установление причастности такого источника зажигания к возникновению пожара становится актуальной задачей [4], [6], [8], [9].

В настоящее время в пожарно-технической экспертизе отсутствуют какие-либо сведения или экспертные методики, которые позволяли бы доказывать причастность к пожару аварийного режима работы литий-ионных аккумуляторных батарей, и, более того, выявлять сам факт аварийного режима, а именно теплового разгона.

В рамках данной статьи изложены результаты экспериментальных опытов, которые проводились с литий-ионными аккумуляторными батареями после принудительного провоцирования теплового разгона, а также их исследования методом сканирующей электронной микроскопии.

Методы и принципы исследования

В данной работе в качестве образцов использовались литий-ионные аккумуляторные батареи в количестве 20 штук, типа «18650» емкостью 3500 мАч, номинальным напряжением 3,7 В. Согласно данным производителя, анод батарей изготовлен из углерода, катод выполнен из оксида металла, а электролит состоит из соли лития в органическом растворителе. Сепаратор представляет собой тонкий лист микроперфорированного пластика. Катод и анод покрыты алюминиевой и медной фольгой соответственно [10], [11], [12], [13]. Батареи заряжались на 50 и 100 % с использованием зарядного устройства с контролем заряда.

Экспериментальное моделирование теплового разгона литий-ионной аккумуляторной батареи проводилось с использованием муфельной печи. Предварительно заряженный до необходимого уровня аккумулятор нагревался до температур возникновения теплового разгона со скоростью 10 °C/мин, после чего эксперимент прекращался.

Исследование полученных в ходе эксперимента образцов проводилось методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). При анализе методом СЭМ применялся сканирующий электронный микроскоп Tescan VEGA\\XMU с вольфрамовым катодом и высоким вакуумом в камере с системой энергодисперсионного микроанализа Inca Energy 350 и детектором X-MAX 80 с площадью кристалла 80 мм². Использовались следующие сигналы детекторов микроскопа. Сигнал вторичных электронов (SE-изображение) для исследования топографии поверхности. Сигнал отраженных электронов, получаемый с помощью BSE-детектора, применялся для анализа различия материала по среднему атомному весу. При наличии в материале образца неоднородности состава его изображение имеет хорошо различимые области с четкими границами между ними. В соответствии с этим, светлые области будут соответствовать материалу с более высоким атомным номером [14], [15]. Также применялось картирование поверхности, т.е. получение карт распределения элементов по площади на исследуемом образце. Процесс накопления карт элементов происходил при наборе интенсивности характеристических рентгеновских линий химических элементов во время сканирования пучком электронов. По полученным спектрам отдельных точек или областей строились карты распределения химических элементов.

Перед проведением исследований методом СЭМ образцы не подвергались пробоподготовке.

Основные результаты

Тепловой разгон литий-ионных батарей, используемых в эксперименте, приводил к следующим последствиям. При 50 и 100% заряда происходил достаточно мощный выброс пламени, вызванный горением электролита. Разгерметизация сопровождалась сильным хлопком и разлетом внутренних составляющих батарей, в частности медной и алюминиевой фольги, на расстояние до 6 м. Температура, при которой происходила взрывная разгерметизация, составляла величину 340 – 350 °C.

С увеличением процента заряда, который имела литий-ионная аккумуляторная батарея до её теплового разгона, возрастала степень повреждения внешней оболочки аккумулятора. При относительно низких процентах заряда оболочка сохраняла свою целостность за исключением её торцевой части, где наблюдалось отсутствие анодного контакта. При более высоких процентах заряда в ходе теплового разгона происходила деформация наружной оболочки с её частичным.

Обсуждение



Рисунок 1 - Последствия разгерметизации литий-ионной аккумуляторной батареи после теплового разгона, возникшего внутри нее:

а – 50 % заряд батареи; б – 100 % заряд батареи

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.63.1>

При визуальном исследовании остатков внутреннего содержимого аккумуляторов после теплового разгона на медной фольге обнаружены оплавления металла серого цвета, предположительно, являющиеся остатками алюминиевой фольги. Оплавления имеют, как шарообразную, так и неправильную форму, размер самых крупных оплавлений достигает величины 1 мм (рис 2). Также следует отметить, что, по визуальной оценке, участков, на которых обнаруживаются оплавленные частицы, становится больше при увеличении степени заряда.

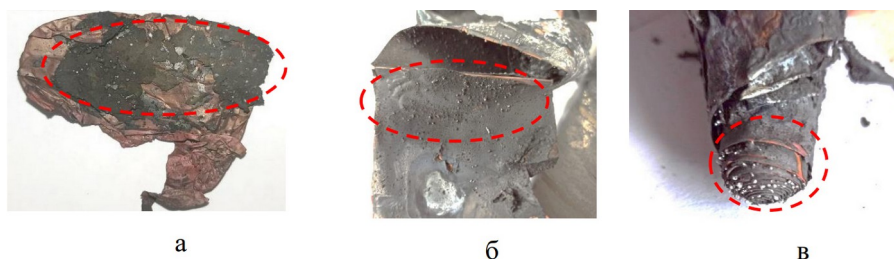


Рисунок 2 - Оплавления, обнаруженные на остатках литий-ионных аккумуляторных батареях после теплового разгона при различных степенях заряда:

а – 50 % заряда; б, в – 100 % заряда

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.63.2>

В результате теплового разгона литий-ионной батареей при 50 % заряда обнаружены участки с множественными частицами сферической формы, которые можно наблюдать на электронно-микроскопических SE-изображениях поверхности медной фольги (рис. 3). Средний размер большинства частиц составляет 5 мкм. Также на медной фольге были обнаружены участки с частицами диаметром порядка 25 мкм, предположительно образовавшимися в результате плавления алюминиевой фольги (рис. 2, 3).

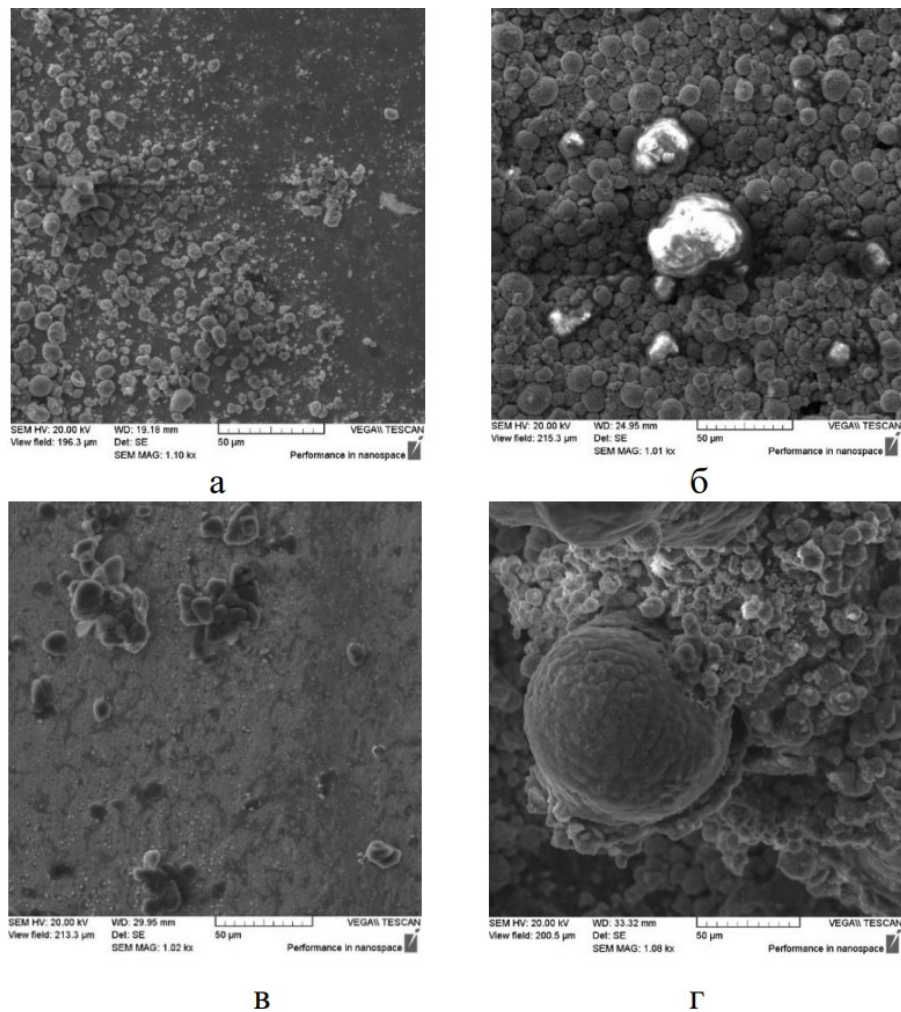


Рисунок 3 - Морфология поверхности медной фольги после теплового разгона литий-ионной батареи, SE-изображение:

а, б – 50 % заряда; в, г – 100 % заряда
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.63.3>

При тепловом разгоне 100% заряженной литий-ионной батареи структура поверхности медной фольги становится однородной с небольшими включениями частиц различной формы (рис. 3). При этом участков с частицами расплавленной алюминиевой фольги становится значительно больше. На SE-изображении, показанном на рис. 3, продемонстрированы частицы, предположительно образовавшиеся в результате плавления алюминиевой фольги, их размер варьируется от 50 до 1000 мкм (рис. 3).

Для анализа распределения химических элементов на остатках медной фольги было проведено картирование (рис. 4).

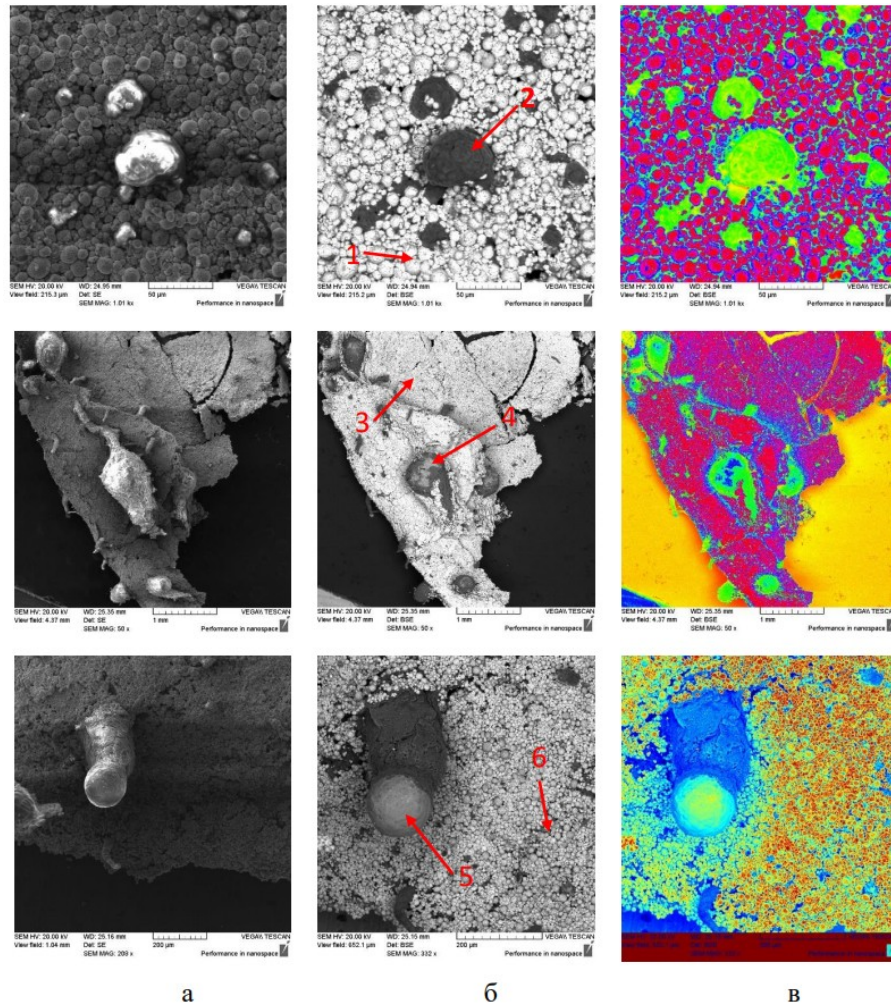


Рисунок 4 - Морфология и средний химический состав поверхности вещества с медной фольги после теплового разгона литий-ионной батареи:

а – SE-изображение; б – BSE-изображение; в – картирование; *зеленый* – алюминий; *красный (розовый)* - никель, марганец, кобальт; *синий* – графит

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.63.4>

Примечание: цифрами обозначены участки анализа элементного состава (см. табл. 1); 50 % заряда

На детальных изображениях поверхности медной фольги после теплового разгона при 50 % зарядке показаны частицы расплавленной алюминиевой фольги. Это подтверждают и карты распределения элементов по поверхности (рис. 4) и анализ химического состава (табл. 1). Зона вокруг частиц алюминия, по химическому составу состоит в основном из никеля (до 50 %), кобальта и марганца (до 10%). Данные элементы, очевидно, входят в состав материалов, из которых изготавливается катод, а именно слоистые оксиды лития – LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2$.

Таблица 1 - Химический состав различных участков поверхности остатков литий-ионных аккумуляторных батарей после теплового разгона

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.63.5>

Участок анализа	Химический состав, % весовой										
	C	O	F	Al	Si	P	S	Mn	Fe	Co	Ni
1	61,12	18,90	5,63	0,24	0,46	0,36	-	1,30	-	1,44	10,54
2	-	16,51	-	83,49	-	-	-	-	-	-	-
3	11,09	21,35	6,38	2,40	-	0,23	-	5,52	-	6,36	46,67
4	17,13	10,32	4,78	54,82	-	0,47	-	1,4	0,38	1,8	9,57
5	-	16,51	-	83,49	-	-	-	-	-	-	-

6	11,09	21,35	6,38	2,40	-	0,23	-	5,52	-	6,36	46,67
---	-------	-------	------	------	---	------	---	------	---	------	-------

Примечание: «-» - химический элемент не обнаружен; 50 % заряда

Исследование остатков алюминиевой фольги показало, что на ее поверхности обнаружены участки с частицами шарообразной формы (рис. 5). Химический состав и картирование показали, что данные частицы содержат никель, марганец и кобальт (табл. 2). Из карт распределения элементов также видно, что вся однородная поверхность (синий цвет) это алюминий, а участки розового цвета – частицы, содержащие в своем составе металлы – никель, кобальт и марганец, и кислород (рис. 5).

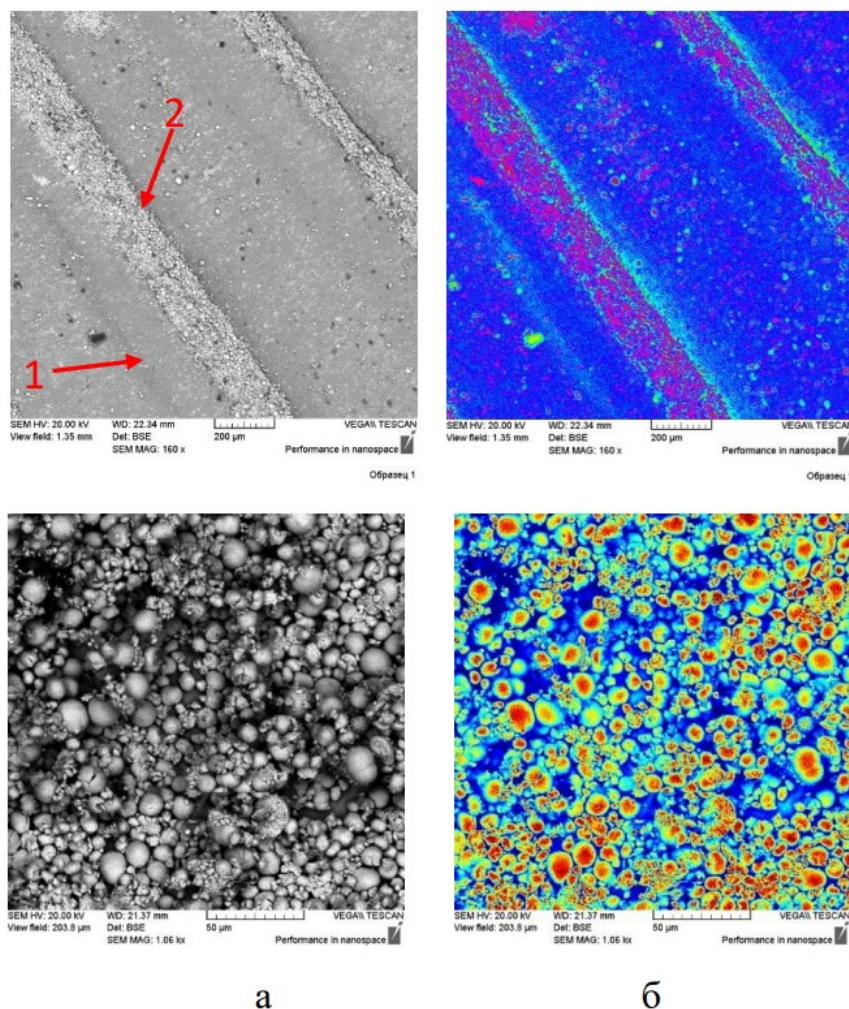


Рисунок 5 - Морфология и средний химический состав поверхности вещества на алюминиевой фольге после теплового разгона литий-ионной батареи (50 % заряда): а – BSE-изображение; б – картирование; синий (голубой) - алюминий; красный (розовый) - никель, марганец, кобальт
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.63.6>

Примечание: цифрами обозначены точечные участка анализа элементного состава (см. табл. 2)

Таблица 2 - Химический состав различных участков поверхности остатков литий-ионных аккумуляторных батарей после теплового разгона

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.63.7>

Участок анализа	Химический состав, % весовой										
	C	O	F	Al	Si	P	S	Mn	Fe	Co	Ni
1	8,83	20,09	12,50	0,80	-	0,75	-	5,25	-	6,43	45,36

2	17,13	10,32	4,78	54,82	-	0,47	-	1,14	0,38	1,38	9,57
---	-------	-------	------	-------	---	------	---	------	------	------	------

Примечание: «-» - химический элемент не обнаружен; 50 % заряда

Таким образом, на фрагментах алюминиевой фольги, так же как и на фрагментах медной фольги при тепловом разгоне 50 % заряда, присутствуют частицы вещества, которые входят в состав материалов, из которых изготавливается катод.

Также была исследована внутренняя поверхность литий-ионного аккумулятора при 100 % заряде. На внутренней поверхности стального корпуса литий-ионной аккумуляторной батареи были обнаружены шарообразные частицы, химический состав которых представляет собой никель (рис. 6, табл. 3).

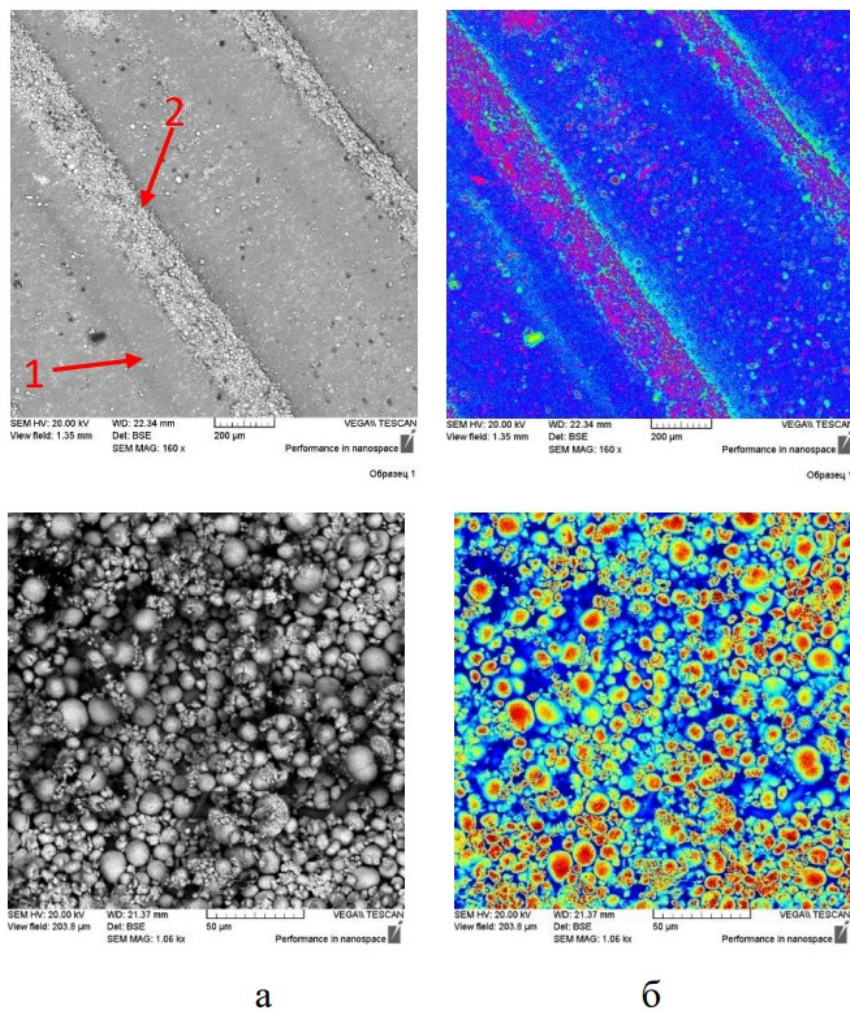


Рисунок 6 - Морфология и средний химический состав внутренней поверхности стального корпуса литий-ионной батареи после теплового разгона:

a, б – BSE-изображение; в – картирование; зелёный цвет – никель; синий – железо

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.63.8>

Примечание: цифрами обозначены точечные участка анализа элементного состава (см. табл. 3); 100 % заряда

Таблица 3 - Химический состав на внутренней поверхности корпуса литий-ионных аккумуляторных батарей после теплового разгона (100 % заряда)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.63.9>

Учас ток анал иза	Химический состав, % весовой											
	C	O	F	Al	Ti	P	S	Mn	Fe	Co	Ni	Cu

1	7,33	2,02	-	1,08	0,41	-	-	-	87,8 5	-	0,82	0,49
2	13,7 3	2,64	7,41	0,37	-	0,29	0,32	10,0 7	-	9,79	55,3 8	-
3	14,4 0	29,9 8	-	-	-	-	-	4,56	2,58	5,81	42,6 6	-

Примечание: Примечание: «-» - химический элемент не обнаружен

Средний размер таких частиц составляет 10 мкм. Такие частицы обнаруживались группами на отдельных участках внутренней поверхности корпуса. В частности, их максимальное количество было обнаружено в районе плюсового контакта аккумуляторной батареи (рис. 6).

В результате проведенных экспериментальных и лабораторных исследований на остатках литий-ионных батарей установлены признаки, характерные для их теплового разгона. К числу таких признаков относятся металлические частицы, обнаруженные на элементах катода и корпусе батарей.

Закключение

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено следующее.

Тепловой разгон литий-ионной аккумуляторной батареи сопровождается выбросом её содержимого, в частности, множественных фрагментов анода и катода, в основном медной фольги, и частично алюминиевой фольги. Разброс отдельных фрагментов достигал 6 метров.

На медной и алюминиевой фольге обнаружены частицы, которые, судя по химическому и фазовому составу, являются компонентами веществ, входящих в состав материалов катода.

На поверхности медной фольги присутствуют алюминиевые частицы шарообразной и произвольной формы, средний размер которых, в зависимости от степени заряда аккумулятора, варьируется от 25 до 1000 мкм. На аккумуляторах, заряженных на 100 %, таких частиц обнаруживается больше.

На поверхности алюминиевой и медной фольги были обнаружены шарообразные частицы среднего размера которых составляет величину 5 мкм. Их химический состав представляет собой в основном никель с примесями кобальта и марганца.

На внутренней поверхности металлического корпуса аккумулятора обнаружены шарообразные частицы среднего размером 10 мкм, основным химическим элементом частиц является никель.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при проведении экспертизы пожаров с целью установления факта работы литий-ионной аккумуляторной батареи в аварийном режиме при тепловом разгоне, а также при дальнейших научных исследованиях подобного рода пожароопасных объектов.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Плотников В.Г. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов и низковольтных источников питания на их основе. / В.Г. Плотников, И.Д. Чешко, С.А. Кондратьев // Расследования пожаров. — 2014. — 4. — с. 53-58.
2. Wang Q A Review of Lithium Ion Battery Failure Mechanisms and Fire Prevention Strategies. / Q Wang, B Mao, S.I. Stoliarov et al. // Prog. Energy. Combust. Sci. — 2019. — 73. — p. 95-131. — DOI: 10.1016/j.pecs.2019.03.002
3. Скундин А.М. Современное состояние и перспективы развития исследований литиевых аккумуляторов. / А.М. Скундин, О.Н. Ефимов, О.В. Ярмоленко // Успехи химии.. — 2002. — 71(4). — с. 329-346. — DOI: 10.1070/RC2002v071n04ABEH000706
4. Shahid S. A Review of Thermal Runaway Prevention and Mitigation Strategies for Lithium-ion Batteries. / S. Shahid, M. Agelin-Chaab // Energy Conversion and Management. — 2022. — 16. — p. 100. — DOI: 10.1016/j.ecmx.2022.100310
5. Fu Y. An Experimental Study on Burning Behaviors of 18650 Lithium Ion Batteries Using Cone Calorimeter. / Y. Fu, S. Lu, K. Li et al. // Journal of Power Sources. — 2015. — 273. — p. 216-222. — DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.09.039
6. Смелков Г.И. К вопросу о пожарной опасности аккумуляторных батарей. / Г.И. Смелков, В.А. Пехотиков, А.И. Рябиков и др. // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — 5. — с. 56-62. — DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-56-62
7. Мельник А.А. Основные факторы, провоцирующие пожарную опасность литий-ионных аккумуляторов. / А.А. Мельник, Ю.Н. Елисеев, А.В. Мокряк // Техносферная безопасность. — 2021. — 2(31). — с. 113-116.

8. Mao B. Self-heating Reaction and Thermal Runaway Criticality of the Lithium Ion Battery. / B. Mao, P. Huang, H. Chen et al. // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2019. — 149. — p. 119178. — DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119178
9. Chen M. Effects of Heat Treatment and SOC on Fire Behaviors of Lithium-ion Batteries Pack. / M. Chen, D. Ouyang, S. Cao et al. // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2018. — 136. — DOI: 10.1007/s10973-018-7864-9
10. Chen W.C. Effects of Thermal Hazard on 18650 Lithium-ion Battery under Different States of Charge. / W.C. Chen, J. Li, C.M. Shu et al. // J. Therm. Anal. Calorim.. — 2015. — 121. — p. 525-531. — DOI: 10.1016/j.est.2020.101232
11. Zhao C. Thermal Runaway Hazards Investigation on 18650 Lithium-ion Battery Using Extended Volume Accelerating Rate Calorimeter. / C. Zhao, J. Sun, Q. Wang // Journal of Energy Storage. — 2020. — 28. — p. 101232. — DOI: 10.1016/j.est.2020.101232
12. Schmich R. Performance and Cost of Materials for Lithium-based Rechargeable Automotive Batteries. / R. Schmich, R. Wagner, G. Höppl // Nat Energy . — 2018. — 3. — p. 267-278 . — DOI: 10.1038 / s41560-018-0107-2
13. Юнчиц В.М. Некоторых вопросах исследования литий-ионных аккумуляторных батарей при проведении пожарно-технической экспертизы. / В.М. Юнчиц, А.П. Балобан // Судебная Экспертиза Беларуси. — 2021. — 2(13). — с. 68-74.
14. Уманский Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский — М.: Металлургия, 1982. — 632 с.
15. Криштал М.М. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения / М.М. Криштал, И.С. Ясников, В.И. Полунин и др. — М.: Техносфера, 2009. — 208 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Plotnikov V.G. Pozharnaya opasnost' litij-ionny'x akkumulyatorov i nizkovol'tny'x istochnikov pitaniya na ix osnove [Fire Hazard of Lithium-ion Batteries and Low-voltage Power Supplies Based on Them]. / V.G. Plotnikov, I.D. Cheshko, S.A. Kondrat'ev // Rassledovaniya pozharov [Investigation of Fires]. — 2014. — 4. — p. 53-58. [in Russian]
2. Wang Q A Review of Lithium Ion Battery Failure Mechanisms and Fire Prevention Strategies. / Q Wang, B Mao, S.I. Stoliarov et al. // Prog. Energy. Combust. Sci. — 2019. — 73. — p. 95-131. — DOI: 10.1016/j.peccs.2019.03.002
3. Skundin A.M. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy' razvitiya issledovaniy litiev'x akkumulyatorov [The State-of-the-art and Prospects for the Development of Rechargeable Lithium Batteries]. / A.M. Skundin, O.N. Efimov, O.V. Yarmolenko // Uspexi ximii. [Russian Chemical Reviews]. — 2002. — 71(4). — p. 329-346. — DOI: 10.1070/RC2002v071n04ABEH000706 [in Russian]
4. Shahid S. A Review of Thermal Runaway Prevention and Mitigation Strategies for Lithium-ion Batteries. / S. Shahid, M. Agelin-Chaab // Energy Conversion and Management. — 2022. — 16. — p. 100. — DOI: 10.1016/j.ecmx.2022.100310
5. Fu Y. An Experimental Study on Burning Behaviors of 18650 Lithium Ion Batteries Using Cone Calorimeter. / Y. Fu, S. Lu, K. Li et al. // Journal of Power Sources. — 2015. — 273. — p. 216-222. — DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.09.039
6. Smelkov G.I. K voprosu o pozharnej opasnosti akkumulyatorny'x batarej [On the Issue of Fire Danger of Batteries]. / G.I. Smelkov, V.A. Pexotikov, A.I. Ryabikov et al. // Bezopasnost' truda v promy'shlennosti [Occupational Safety in Industry]. — 2020. — 5. — p. 56-62. — DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-56-62 [in Russian]
7. Mel'nik A.A. Osnovny'e faktory', provociruyushhie pozharnuyu opasnost' litij-ionny'x akkumulyatorov [The Main Factors Provoking the Fire Hazard of Lithium-ion Batteries]. / A.A. Mel'nik, Yu.N. Eliseev, A.V. Mokryak // Texnosfernaya bezopasnost' [Technosphere Safety]. — 2021. — 2(31). — p. 113-116. [in Russian]
8. Mao B. Self-heating Reaction and Thermal Runaway Criticality of the Lithium Ion Battery. / B. Mao, P. Huang, H. Chen et al. // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2019. — 149. — p. 119178. — DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119178
9. Chen M. Effects of Heat Treatment and SOC on Fire Behaviors of Lithium-ion Batteries Pack. / M. Chen, D. Ouyang, S. Cao et al. // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. — 2018. — 136. — DOI: 10.1007/s10973-018-7864-9
10. Chen W.C. Effects of Thermal Hazard on 18650 Lithium-ion Battery under Different States of Charge. / W.C. Chen, J. Li, C.M. Shu et al. // J. Therm. Anal. Calorim.. — 2015. — 121. — p. 525-531. — DOI: 10.1016/j.est.2020.101232
11. Zhao C. Thermal Runaway Hazards Investigation on 18650 Lithium-ion Battery Using Extended Volume Accelerating Rate Calorimeter. / C. Zhao, J. Sun, Q. Wang // Journal of Energy Storage. — 2020. — 28. — p. 101232. — DOI: 10.1016/j.est.2020.101232
12. Schmich R. Performance and Cost of Materials for Lithium-based Rechargeable Automotive Batteries. / R. Schmich, R. Wagner, G. Höppl // Nat Energy . — 2018. — 3. — p. 267-278 . — DOI: 10.1038 / s41560-018-0107-2
13. Yunchicz V.M. Nekotory'x voprosax issledovaniya litij-ionny'x akkumulyatorny'x batarej pri provedenii pozharnotexnicheskoy e'kspertizy' [Some Issues of Research of Lithium-ion Batteries during Fire-technical Expertise]. / V.M. Yunchicz, A.P. Baloban // Sudebnaya E'kspertiza Belarusi [Forensic Examination Of Belarus]. — 2021. — 2(13). — p. 68-74. [in Russian]
14. Уманский Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия [Crystallography, Radiography and Electron Microscopy] / Я.С. Уманский — М.: Металлургия, 1982. — 632 p. [in Russian]
15. Криштал М.М. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения [Scanning Electron Microscopy and X-ray Perctal Microanalysis in Practical Application Examples] / М.М. Криштал, И.С. Ясников, В.И. Полунин et al. — М.: Техносфера, 2009. — 208 p. [in Russian]