

Научная статья
УДК 614.841.2.001.2
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.17.72.024

Выявление признаков теплового разгона литий-ионного аккумулятора, используемого в электротранспорте, после пожара

Антон Анатольевич Мельник¹

Андрей Юрьевич Мокряк¹

Владимир Андреевич Андреев¹

Анна Васильевна Мокряк¹

Василий Валерьевич Жданов²

¹Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Анна Васильевна Мокряк tokryakanna@mail.ru

Аннотация. Исследование направлено на выявление признаков теплового разгона литий-ионных аккумуляторов (ЛИА), применяемых в электротранспорте, после пожара. Актуальность работы обусловлена ростом числа возгораний, связанных с эксплуатацией электромобилей, электросамокатов и других видов транспорта, где тепловой разгон выступает ключевым фактором риска. В ходе исследования использовались комплексные методы: визуальный анализ морфологических изменений аккумуляторов, рентгенофлуоресцентный анализ (РФЛА) для определения химического состава компонентов и сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), позволившая изучить морфологию поверхностей.

Экспериментальные данные показали, что при перезаряде ЛИА происходит полное разрушение алюминиевого катода из-за экзотермических реакций с электролитом, тогда как при внешнем тепловом воздействии алюминий сохраняется в виде шарообразных частиц (20–450 мкм) благодаря медленному и равномерному нагреву. Анализ элементного состава выявил значительные различия: в случае перезаряда доминируют углерод, никель, кобальт и марганец, в то время как при внешнем нагреве сохраняется высокое содержание алюминия.

Полученные результаты демонстрируют, что механизм теплового разгона существенно зависит от типа воздействия (перезаряд /внешний нагрев). Это открывает возможности для разработки критериев экспертизы пожаров, связанных с ЛИА, и совершенствования методов их диагностики. Практическая значимость исследования заключается в предоставлении инструментов для идентификации причин возгораний в электротранспорте, что способствует повышению безопасности эксплуатации литий-ионных батарей и снижению рисков для пользователей.

Ключевые слова: электротранспорт, тепловой разгон, литий-ионные аккумуляторы, экспертиза пожаров

Для цитирования: Мельник А.А., Мокряк А.Ю., Андреев В.А., Мокряк А.В., Жданов В.В. Выявление признаков теплового разгона литий-ионного аккумулятора, используемого в электротранспорте, после пожара // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 3 (38). С. 330-339. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.17.72.024>.

Original article.

Identification of signs of thermal runaway of a lithium-ion battery used in electric vehicles after a fire

Anton A. Melnik¹

Andrey Yu. Mokryak¹

Vladimir A. Andreev¹

Anna V. Mokryak¹

Vasily V. Zhdanov²

¹*Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, Russia*

²*A.F. Ioffe Institute of Physics and Technology of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia*

Corresponding author: Anna V. Mokryak, mokryakanna@mail.ru

Abstract. The study is aimed at identifying signs of thermal overlocking of lithium-ion batteries (Li-Ion) used in electric vehicles after a fire. The urgency of the work is due to the growing number of fires associated with the operation of electric vehicles, electric scooters and other modes of transport, where thermal acceleration is a key risk factor. During the study, complex methods were used: visual analysis of morphological changes in batteries, X-ray fluorescence analysis (XFIA) to determine the chemical composition of components, and scanning electron microscopy (SEM), which made it possible to study the morphology of surfaces.

Experimental data have shown that when the battery is recharged, the aluminum cathode is completely destroyed due to exothermic reactions with the electrolyte, whereas when exposed to external heat, aluminum remains in the form of spherical particles (20-450 microns) due to slow and uniform heating. The analysis of the elemental composition revealed significant differences: in the case of overcharging, carbon, nickel, cobalt and manganese dominate, while high aluminum content remains during external heating.

The results obtained demonstrate that the mechanism of thermal acceleration significantly depends on the type of exposure (overcharging /external heating). This opens up opportunities for the development of criteria for the examination of fires associated with LIA, and the improvement of methods for their diagnosis. The practical significance of the study is to provide tools for identifying the causes of fires in electric vehicles, which helps to improve the safety of lithium-ion batteries and reduce risks for users.

Keywords: electric vehicles, thermal acceleration, lithium-ion batteries, fire expertise

For citation: Melnik A.A., Mokryak A.Yu., Andreev V.A., Mokryak A.V., Zhdanov V.V. Identification of signs of thermal runaway of a lithium-ion battery used in electric vehicles after a fire // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 3 (38). С. 330-339. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.17.72.024>.

Введение

С возрастанием интереса к электромобилям и другим видам электротранспорта, таким как электросамокаты, электробусы и прочие, становится всё более значимым изучение безопасности литий-ионных аккумуляторов, применяемых в этих устройствах.

В последние годы в мировой практике наблюдается увеличение случаев возгораний, связанных с использованием аккумуляторов, что ставит под угрозу безопасность пользователей. Тепловой разгон — это экзотермическая реакция, которая возникает при перегреве литий-ионного аккумулятора, может привести к значительным повреждениям как самого устройства, так и окружающих. Однако исследований по термической безопасности литий-ионных батарей все еще недостаточно. Большое количество исследований показало, что литий-ионные аккумуляторы могут выходить из строя при тепловом, механическом и электрическом воздействии [1], а тепловой разгон литий-ионных батарей является основной причиной возгорания и взрыва аккумуляторов [2-3, 8, 10]. Поэтому очень важно понять,

как происходит тепловой разгон и каковы особенности его распространения в литий-ионных батареях при различных условиях возникновения [4-5].

Методы исследования

Эксперимент по моделированию теплового разгона проводили на следующих образцах:

1. Литий-ионные аккумуляторы (Рис.1):

Характеристики:

- Корпус: призматический алюминиевый с полиамидной электроизоляционной пленкой.

- Номинальная ёмкость: 117 Ач.

- Напряжение: 3,75 В.

- Масса: 1,8 кг.

- Габариты: 52 × 146 × 106 мм.

Энергоёмкость: 421,80 Вт·ч (класс опасности 9).



Рис.1. Внешний вид призматического литий-ионного аккумулятора

2. Батарейные модули (Рис.2), которые состоят из 28 последовательно соединённых призматических аккумуляторов представленных на Рис.1.

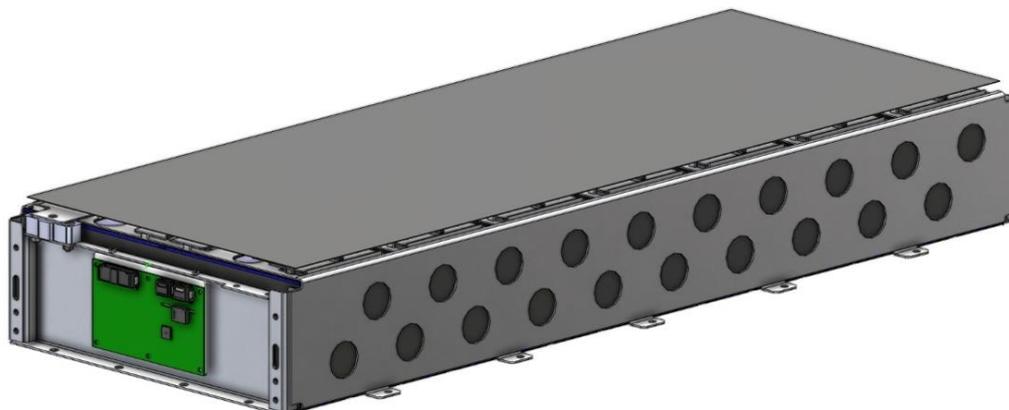


Рис.2. Внешний вид батарейного модуля

Часть литий-ионных аккумуляторов была подвергнута перезаряду, а другая часть — внешнему тепловому воздействию до состояния теплового разгона.

В рамках данного исследования были применены комплексные методы для выявления признаков теплового разгона литий-ионных аккумуляторов:

- Визуальное исследование, направленное на первоначальную оценку морфологических изменений в структуре аккумулятора.
- Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), для определения химического состава активных и пассивных компонентов батареи.
- Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), обеспечивающая детальное изучение микроструктуры и топографии поверхности аккумуляторных элементов на субмикронном уровне [6-7, 9].

Основная часть

Наибольший риск возникновения пожара литий-ионной батареи возникает при сильном внешнем тепловом воздействии (внешний пожар) или при существенном перезаряде батареи. При наступлении перечисленных непроеekтных ситуаций, выходящих за пределы разумно допустимых, термическая нестабильность анодных, катодных материалов, повышенная горючесть электролита может провоцировать тепловой разгон аккумуляторов в составе батареи – экзотермическую реакцию разложения компонентов аккумулятора с непрерывным выделением тепла в условиях, когда количество образующегося тепла превышает количество тепла, рассеивающегося в окружающую среду. Тепловой разгон приводит к существенному росту температуры и возгоранию литий-ионных аккумуляторов в составе батареи.

В рамках эксперимента, направленного на моделирование внешних тепловых воздействий на аккумулятор, использовался электрический теплогреватель с терморегулятором. Этот нагреватель мощностью от 1,6 до 2,5 кВт был установлен вплотную к боковой поверхности литий-ионного аккумулятора (ЛИА) (Рис.3).



Перегрев



Источник открытого огня

Рис.3. Эксперимент по моделированию внешнего теплового воздействия на литий-ионные аккумуляторы до состояния теплового разгона

Моделирование эксперимента по возгоранию литий-ионного аккумулятора в результате его перезаряда в составе батарейного модуля проводился с использованием лабораторного зарядного устройства. Ток перезаряда составил 150 А.



Рис.4. Моделирование воздействия перезаряда на литий-ионные аккумуляторы до состояния теплового разгона

В результате проведенного эксперимента были зафиксированы следующие основные признаки:

В случае теплового разгона литий-ионного аккумулятора, вызванного перезарядом, алюминиевый катод полностью разрушился (Рис.5).

Это можно объяснить тем, что при высоких температурах происходят экзотермические реакции, которые могут привести к разложению активных материалов. В результате алюминий вступает в реакцию с электролитом и другими компонентами, что приводит к его полному исчезновению.

В литий-ионном аккумуляторе алюминиевый катод обычно используется в качестве токосъемника, и в нормальных условиях он не должен активно реагировать с электролитом. Однако при перезаряде, когда электролит взаимодействует с алюминиевым катодом, может происходить экзотермическая реакция, связанная с коррозией алюминия. Например, литий-алюминат (LiAlO_2) может образовываться в результате реакций между литий-содержащими соединениями и алюминием, что может привести к коррозии. Некоторые литий-содержащие соли, такие как литий-фторид (LiF) или литий-сульфат (Li_2SO_4), могут быть агрессивными в определенных условиях, особенно если они образуются в результате разложения электролита. Эти реакции могут быть особенно активны при высоких температурах и в условиях перезаряда, что приводит к коррозии алюминиевого катода.



Рис.5. Внешний вид литий-ионного аккумулятора, после теплового разгона вызванного перезарядом

Однако в случае теплового разгона литий-ионного аккумулятора, вызванного внешним тепловым воздействием, нагрев аккумулятора происходил более медленно и равномерно, в результате чего алюминий частично сохранился в виде шариков. Это объясняется тем, что при медленном нагреве реакции протекают менее интенсивно, что позволяет некоторым частям алюминия оставаться нетронутыми (Рис.6).

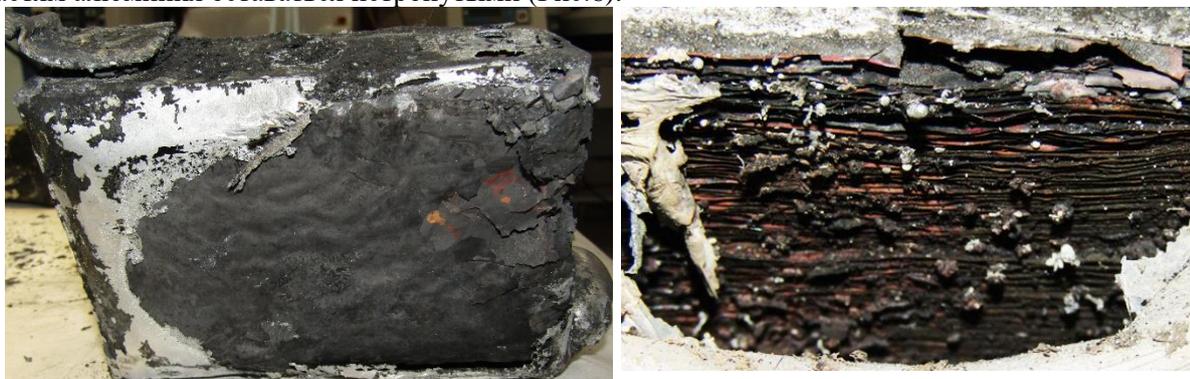


Рис.6. Внешний вид литий-ионного аккумулятора, после теплового разгона вызванного внешним тепловым воздействием

Анализ, проведенный с помощью сканирующего электронного микроскопа, показал, что на поверхности медной фольги после перезаряда был обнаружен углерод. Также были обнаружены фосфор, никель, кобальт и марганец. Эти элементы, очевидно, входят в состав материалов, из которых изготавливается активный материал: LiFePO_4 , LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2$. Алюминий практически отсутствует (Рис.7, Табл.1).

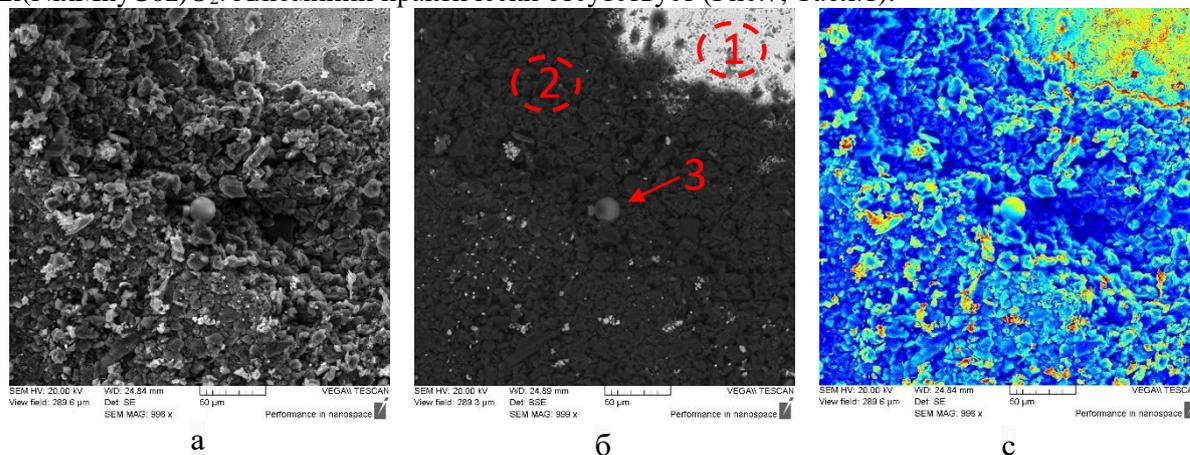


Рис.7. Морфология и средний химический состав поверхности медной фольги после теплового разгона литий-ионной аккумулятора вызванного перезарядом

Цифрами обозначены участки анализа элементного состава (см. Табл.1), где, а – SE-изображение; б – BSE-изображение; в – картирование; цвета: голубой (синий) – графит, салатовый - никель, марганец, кобальт, желтый – медь, красный – алюминий.

Табл.1. Элементный состав поверхности медной фольги литий-ионного аккумулятора после теплового разгона вызванного перезарядом.

Участок анализа	Химический состав, % весовой									
	C	O	F	Al	P	Co	Cu	S	Mn	Ni
1	28,71	4,61	-	-	-	-	66,17	0,51	-	-
2	80,56	5,30	3,15	0,50	0,24	0,96	-	-	3,57	5,72
3	9,43	22,12	-	1,33	-	4,23	-	-	39,54	23,35

При исследовании медной фольги после теплового разгона, вызванного внешним тепловым воздействием, было установлено, что количество алюминия значительно превышает его содержание в образцах, подвергшихся перезаряду (Рис.8, Табл.2). Так же обнаружены углерод, фосфор, никель, кобальт и марганец.

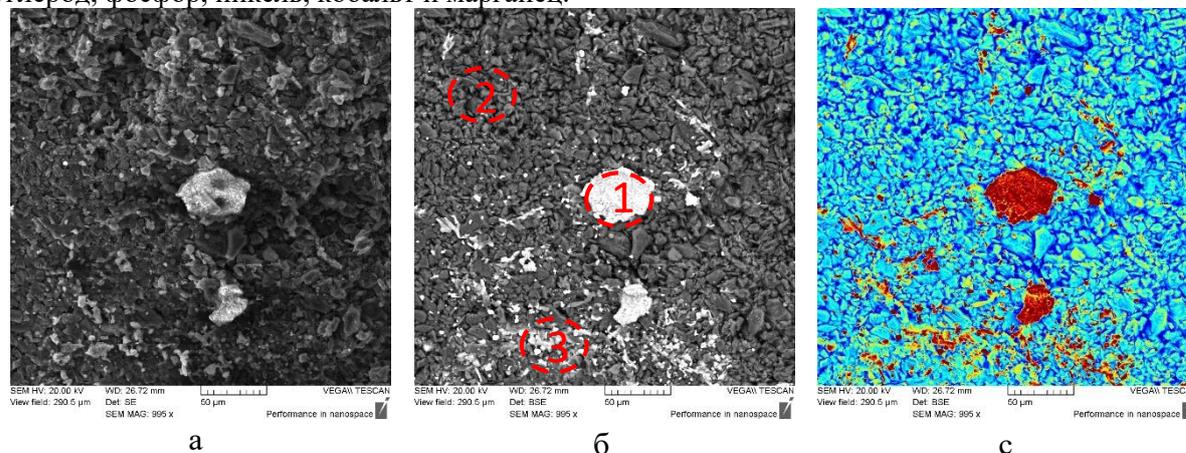


Рис.8. Морфология и элементный состав поверхности медной фольги литий-ионного аккумулятора фольги после теплового разгона литий-ионной аккумулятора вызванного внешне тепловым воздействием

Цифрами обозначены участки анализа элементного состава (см. Табл.2),

где, а – SE-изображение; б – BSE-изображение; в – картирование, цвета: красный (бордовый)– алюминий, салатовый - никель, марганец, кобальт, синий(голубой) – графит, желтый – медь.

Табл.2. Элементный состав поверхности медной фольги литий-ионного аккумулятора после теплового разгона вызванного внешне тепловым воздействием

Участок анализа	Химический состав, % весовой									
	C	O	F	Al	P	Co	Cu	S	Mn	Ni
1	8,65	7,68	0,65	82,11	0,20	-	-	-	0,23	0,49
2	79,95	14,75	1,71	1,70	0,50	1,37	1,16	-	3,63	0,26
3	50,42	16,33	9,55	0,59	0,56	2,12	1,25	0,36	6,06	12,77

Результаты исследования морфологии шарообразных частиц показали, что частицы имеют различный размер, варьирующийся от 20 до 450 мкм, имеют неоднородную структуру, с неровностями и дефектами (Рис.9).

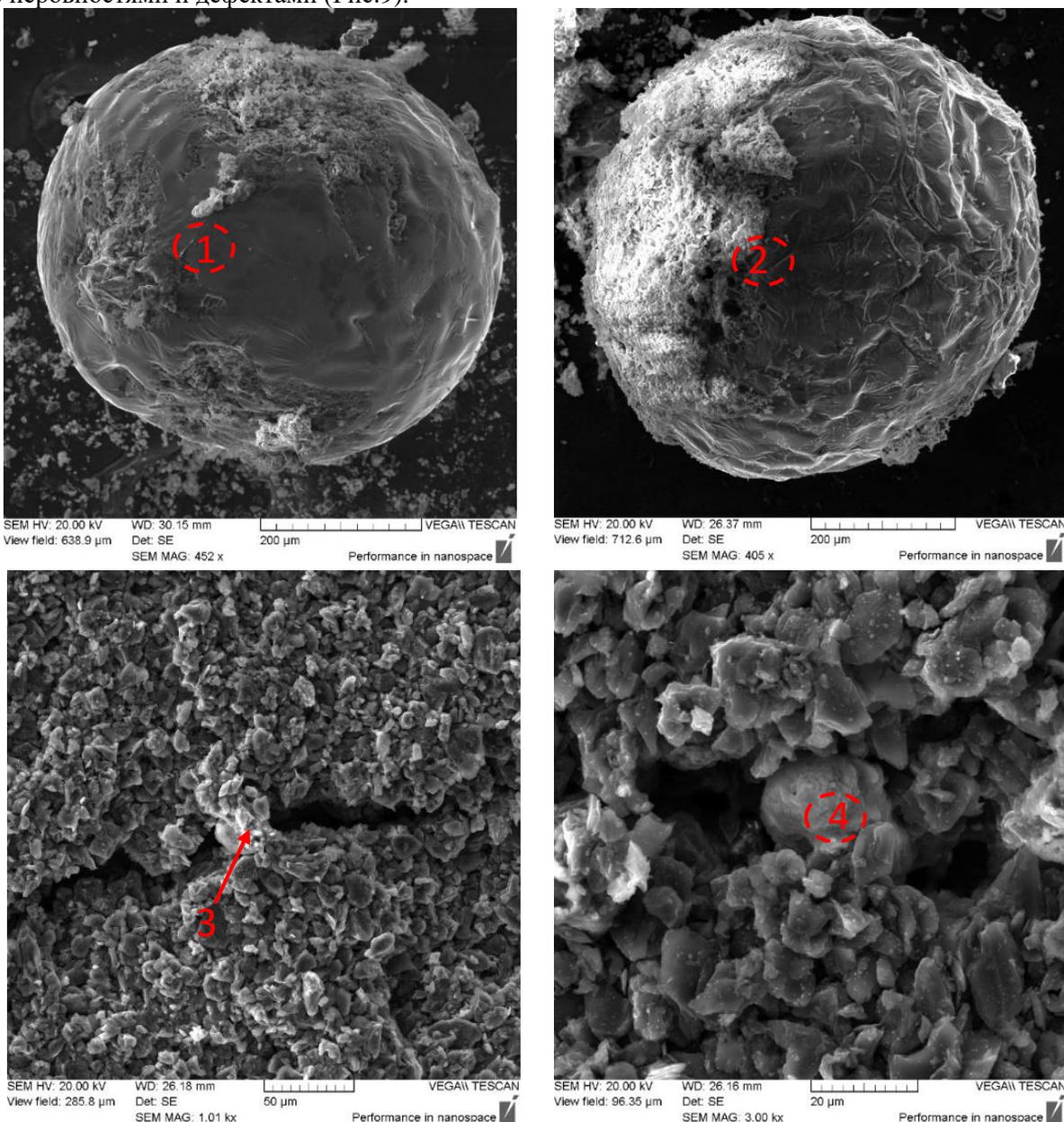


Рис.9. Алюминиевые шарообразные частицы, СЭМ

Цифрами обозначены участки анализа элементного состава (см. Табл.1)

Результаты РФЛА позволили установить, что шарообразные частицы в своём составе преимущественно содержат алюминий (Al) и, по всей видимости, выполняют функцию положительного электрода (катода). Кроме того, были обнаружены следы других элементов, входящих в состав активного материала и других компонентов, используемых при изготовлении литий-ионных аккумуляторов (см. Табл.3).

Табл.3. Состав элементов алюминиевых шариков, найденных на медной фольге литий-ионного аккумулятора после теплового разгона, вызванного внешним тепловым воздействием

Участок анализа	Химический состав, % весовой									
	C	O	F	Al	P	Co	Cu	S	Mn	Ni
1	8,65	7,68	0,65	82,11	0,20	-	-	-	0,23	0,49
2	9,95	14,75	1,71	71,70	0,50	1,37	1,16	-	3,63	0,26
3	10,42	6,33	2,55	67,58	0,56	2,12	1,25	0,36	6,06	2,77
4	28,71	4,61	-	66,17	-	-	-	0,51	-	-

В случае теплового разгона литий-ионного аккумулятора, вызванного перезарядом, алюминиевый катод практически полностью разрушился. Это можно объяснить тем, что при высоких температурах происходят экзотермические реакции, которые могут привести к разложению активных материалов. В результате алюминий вступает в реакцию с электролитом и другими компонентами, что приводит к его исчезновению.

Однако в случае теплового разгона литий-ионного аккумулятора, вызванного внешним тепловым воздействием, нагрев аккумулятора происходил более медленно и равномерно, в результате чего алюминий частично сохранился в виде шариков. Это объясняется тем, что при медленном нагреве реакции протекают менее интенсивно, что позволяет некоторым частям алюминия оставаться нетронутыми.

Выводы

В ходе проведённого исследования были получены экспериментальные данные, которые свидетельствуют о том, что в образцах, подвергшихся перезаряду, происходит практически полное разрушение алюминия вследствие экзотермических реакций, возникающих при высоких температурах. В то же время, в образцах, которые подверглись внешнему тепловому воздействию, наблюдается сохранение алюминия в значительно большем количестве. Это может быть обусловлено более равномерным и медленным нагревом, что предотвращает возникновение резких реакций, приводящих к разрушению алюминия. Полученные результаты указывают на различия в механизмах теплового разгона, вызванных перезарядом и внешним тепловым воздействием. Методы визуального исследования, сканирующей электронной микроскопии и рентгенофлюоресцентного анализа позволили детально изучить изменения в структуре и составе материалов литий-ионного аккумулятора и получить криминалистически значимую информацию.

Список источников

1. Плотников В.Г., Чешко И.Д., Кондратьев С.А. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов и низковольтных источников питания на их основе // Расследования пожаров. — 2014. — № 4. — С. 53–58.
2. Елисеев Ю.Н., Мокряк А.В. Анализ пожарной опасности литий-ионных аккумуляторных батарей // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. — 2020. — № 3. — С. 14–17.
3. Скундин А.М., Ефимов О.Н., Ярмоленко О.В. Современное состояние и перспективы развития исследований литиевых аккумуляторов // Успехи химии. — 2012. — Т. 71, № 4. — С. 378–398.

4. Srinivasan R., Demirev P.A., Carkhuff B.G. et al. Review - Thermal safety management in li-ion batteries: Current issues and perspectives // *J. Electrochem. Soc.* — 2020. — Vol. 167, № 14.
5. Wang Q., Mao B., Stoliarov S.I., Sun J. A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies // *Prog. Energy. Combust. Sci.* — 2019. — Vol. 73. — P. 95–131.
6. Мокряк А.В., Мокряк А.Ю., Мельник А.А. Анализ остатков литий-ионных аккумуляторов после теплового разгона методом сканирующей электронной микроскопии // *Международный научно-исследовательский журнал.* — 2023. — № 4(130). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.130.63.
7. Мокряк А.В., Мельник А.А. Оценка состояния остатков катода литий-ионных аккумуляторов после теплового разгона при экспертизе пожаров // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс.* — 2024. — Т. 13, № 1(65). — С. 127–134.
8. Смелков Г.И., Пехотиков В.А., Рябиков А.И., Назаров А.А. К вопросу о пожарной опасности аккумуляторных батарей // *Безопасность труда в промышленности.* — 2020. — № 5. — С. 56–62. — DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-56-62.
9. Deng D., Qiao J., Qi J. et al. Chapter 6 - Equivalent modeling and parameter identification of power lithium-ion batteries // *State Estimation Strategies in Lithium-ion Battery Management Systems* / Ed. by S. Wang et al. — Elsevier, 2023. — P. 95–124. — ISBN 978-0-443-16160-5. — DOI: 10.1016/B978-0-443-16160-5.00001.
10. Юнчиц В.М., Балобан А.П. Некоторых вопросах исследования литий-ионных аккумуляторных батарей при проведении пожарно-технической экспертизы // *Судебная Экспертиза Беларуси.* — 2021. — № 2 (13). — С. 68–74.

References

1. Plotnikov V.G., Cheshko, I.D., & Kondratyev, S.A. (2014). Fire hazard of lithium-ion batteries and low-voltage power sources based on them [Pozharnaya opasnost' lityi-ionnykh akkumulyatorov i nizkovol'tnykh istochnikov pitaniya na ikh osnove]. *Fire Investigations*, (4), 53-58.
2. Eliseev Yu.N., & Mokryak, A.V. (2020). Analysis of fire hazard of lithium-ion batteries [Analiz pozharnoy opasnosti lityi-ionnykh akkumulyatornykh batarey]. *Bulletin of Saint Petersburg University of the State Fire Service of EMERCOM of Russia*, (3), 14-17.
3. Skundin A.M., Efimov, O.N., & Yarmolenko, O.V. (2012). Current status and prospects of lithium battery research [Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya issledovaniy lityevykh akkumulyatorov]. *Russian Chemical Reviews*, 71(4), 378-398. <https://doi.org/10.1070/RC2012v071n04ABEH004230>.
4. Srinivasan R., Demirev, P.A., Carkhuff, B.G., Santhanagopalan, S., Jeevarajan, J.A., & Barrera, T.P. (2020). Thermal safety management in Li-ion batteries: Current issues and perspectives. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(14).
5. Wang Q., Mao, B., Stoliarov, S.I., & Sun, J. (2019). A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 73, 95-131. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.03.002>.
6. Mokryak A.V., Mokryak, A.Yu., & Melnik, A.A. (2023). Analysis of lithium-ion battery residues after thermal runaway using scanning electron microscopy [Analiz ostatkov lityi-ionnykh akkumulyatorov posle teplovogo razgona metodom skaniruyushchey elektronnoy mikroskopii]. *International Research Journal*, (4), Article 130. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.63>.
7. Mokryak A.V., & Melnik A.A. (2024). Assessment of lithium-ion battery cathode residues after thermal runaway in fire investigations [Otsenka sostoyaniya ostatkov katoda lityi-ionnykh akkumulyatorov posle teplovogo razgona pri ekspertize pozharov]. *21st Century: Results of the Past and Challenges of the Present Plus*, 13 (1), 127-134.
8. Smelkov, G.I., Pekhotikov, V.A., Ryabikov, A.I., & Nazarov, A.A. (2020). On the fire hazard of battery systems [K voprosu o pozharnoy opasnosti akkumulyatornykh batarey]. *Occupational Safety in Industry*, (5), 56-62. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-5-56-62>.
9. Deng D., Qiao J., Qi J. et al. Chapter 6 - Equivalent modeling and parameter identification of power lithium-ion batteries // *State Estimation Strategies in Lithium-ion Battery Management Systems* / Ed. by S. Wang et al. — Elsevier, 2023. — P. 95–124. — ISBN 978-0-443-16160-5. — DOI: 10.1016/B978-0-443-16160-5.00001.

10. Yunchits, V.M., & Baloban, A.P. (2021). On some issues of lithium-ion battery research in fire-technical expertise [Nekotorykh voprosakh issledovaniya lityi-ionnykh akkumulyatornykh batarey pri provedenii pozharno-tekhnicheskoy ekspertizy]. Forensic Expertise of Belarus, 2 (13), 68-74.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.08.2025, одобрена после рецензирования 15.09.2025, принята к публикации 16.09.2025.

The article was submitted 10.08.2025, approved after reviewing 15.09.2025, accepted for publication 16.09.2025.