

# Современные Li-ion аккумуляторы. Типы и конструкция

**Алексей РЫКОВАНОВ**  
rycovanalex@yandex.ru  
**Александр РУМЯНЦЕВ,**  
к. х. н.  
rumyantsev.amr@gmail.com  
**Сергей БЕЛЯЕВ**  
belss751@rambler.ru

**Разнообразие всевозможных Li-ion аккумуляторов, представленных на рынке, не только расширяет возможности выбора, но и порой делает такой выбор случайным. Действительно, до конца понять, что необходимо и как с этим работать, подчас не просто. В серии статей будут рассмотрены основные типы, конструкция, материалы и особенности эксплуатации современных Li-ion аккумуляторов. Авторы надеются, что эти статьи помогут читателям во всем разобраться.**

Прежде чем рассматривать тему, вспомним несколько фактов из истории и определим, что такое Li-ion аккумулятор. После появления в 1970-е годы первичных литиевых элементов возник интерес к разработке многоразовых источников тока с применением электрохимической системы  $\text{Li}^+$  (ион)/Li. И была веская причина: эти элементы отличались высокими удельными характеристиками, а в перспективе можно было получить компактный источник питания. Именно о портативном применении шла тогда речь, о таких аккумуляторах большой емкости никто еще и не задумывался в силу множества проблем и их высокой на тот момент стоимости. В качестве отрица-

тельных электродов в первых образцах таких аккумуляторов использовался металлический литий (по аналогии с первичными элементами). Но при его заряде из-за наличия пассивирующей пленки из продуктов разложения электролита часть лития переходила в неактивное состояние (то есть в частицы, электрически изолированные друг от друга). Образовывающаяся со временем пленка препятствовала прохождению лития на электроды. Другой проблемой являлось образование дендритов, игольчатых кристаллов лития, растущих между электродами. Их рост приводил к короткому замыканию аккумулятора и выходу его из строя (порой с воспламенением и взрывом).

На решение проблемы были направлены значительные усилия: осуществлялся поиск новых электролитов, отвечающих всем требованиям, и всевозможных решений по предотвращению образования дендритов, разрабатывались технологии производства и т. д., однако оставалась самая главная проблема — безопасность. Металлический литий находится внутри корпуса аккумулятора. И при разгерметизации корпуса окисляющийся литий соединялся с кислородом воздуха, что приводило к возгоранию и/или резкому повышению температуры корпуса, а иногда и к взрыву. Разгерметизация могла произойти, во-первых, из-за повышения давления внутри корпуса, например при перезаряде (в штатном режиме заряда); во-вторых, при росте температуры внутри прибора, например при внешнем нагревании; в-третьих, из-за внутреннего короткого замыкания и т. д. Постоянно следить за всеми этими параметрами стало невозможно, потребовались электронные системы постоянного слежения, предотвращающие если не все, то большинство случаев разгерметизации корпуса. На это быстро отреагировала электронная промышленность: компании начали выпуск всевозможных микросхем для Li-ion аккумуляторов и батарей, и с этого времени такие устройства стали неотъемлемой частью любой батареи системы  $\text{Li}^+$  (ион)/Li. (На рис. 1 виден самовосстанавливающийся предохранитель (в виде «квадратика»), находящийся сразу после одного из контактов аккумулятора, перед подключением к плате контроля.)

Опасения были сильны, судя по тому, что одна известная фирма представила на рынок устройство системы обеспечения функционирования (СОФ) (Battery manager systems, BMS). Это устройство содержало три микросхемы (помимо транзисторов, разрывающих цепь нагрузки/заряда), и в нем было реализо-



Рис. 1. Литий-ионный аккумулятор с платой системы обеспечения функционирования

вано два уровня аппаратной защиты, не зависящие друг от друга, и несколько уровней программной защиты (схема содержала специализированный микроконтроллер). Аппаратно в схеме был применен специальный пиропредохранитель, при активации которого пережигалась перемычка, вне зависимости от текущего по нему тока. Управляла «работой» предохранителя специализированная микросхема. Понятно, что все это только увеличивало стоимость конечного изделия и препятствовало выходу батарей на массовый рынок. Необходимы были новые идеи и подходы, и они появились.

Попутно заметим, что на сегодня выпуск литиевых аккумуляторов (с металлическим литием) практически прекращен, этот класс аккумуляторов перекочевал в разряд «спецтехники», и встретить их или купить сейчас практически невозможно. Массовому выпуску аккумуляторов с металлическим литием препятствует и высокая стоимость производства: необходимо иметь оборудование, выполняющее цикл в герметичном объеме, который заполнен инертной для лития средой, при этом в ней не должно содержаться влаги (например, сухие боксы) и т. д.

Однако справедливости ради необходимо отметить, что работы в этом направлении продолжают. Можно выделить два основных: химические источники тока (ХИТ) на основе системы литий — сера (Li/S) и литий — кислород (литий — воздух). Это относится как к первичным элементам (одноразового использования), так и к аккумуляторам (перезаряжаемым). Если удастся решить ряд проблем (включая безопасность), произойдет существенный рост удельных характеристик по сравнению с достигнутыми на сегодня для любого из ХИТ.

В конце 1980-х годов компания Sony предложила иной принцип работы, это направление стало развиваться параллельно с основным на тот момент, которое было описано выше. Так, в 1991 году были выпущены первые промышленные Li-ion аккумуляторы с отрицательным электродом на основе углеродного материала. В основе работы Li-ion аккумулятора лежит принцип интеркаляции, то есть при его заряде литий внедряется в структуру отрицательного электрода (которым служит углеродный материал) и образует интеркаляционное соединение. При обратном процессе литий деинтеркалируется из отрицательного электрода, то есть извлекается из кристаллической решетки углерода, отдавая при этом электрон. Ниже приведены электрохимические реакции на обоих электродах:

- Положительный электрод (на примере кобальтата лития):
  - Заряд —  $\text{LiCoO}_2 - x\text{Li}^+ - x\text{e}^- \rightarrow \text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$ ;
  - Разряд —  $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2 + x\text{Li}^+ + x\text{e}^- \rightarrow \text{LiCoO}_2$ ;
- Отрицательный электрод:
  - Заряд —  $6\text{C} + x\text{Li}^+ + x\text{e}^- \rightarrow \text{Li}_x\text{C}_6$ ;
  - Разряд —  $\text{Li}_x\text{C}_6 - x\text{e}^- \rightarrow x\text{Li}^+ + 6\text{C}$ .

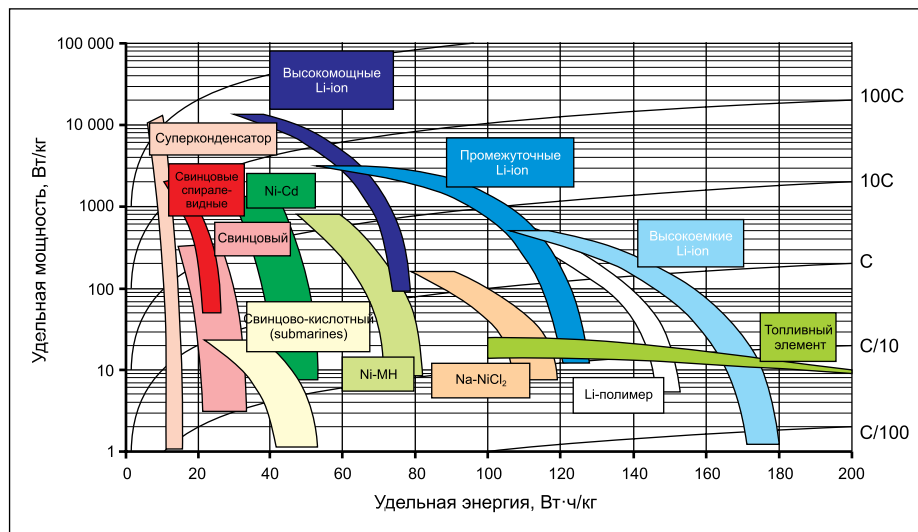


Рис. 2. Удельные характеристики ХИТ.

Для сравнения представлены характеристики суперконденсаторов и топливных элементов

Судя по представленным реакциям, здесь нет металлического лития. По аккумулятору «гуляют» только ионы лития, которые находятся в связанном состоянии, как на положительном электроде, так и на отрицательном. Благодаря этому удалось существенно повысить безопасность эксплуатации таких ХИТ. При обеспечении безопасности не последнюю роль сыграли и новые материалы (например, сепаратора) и технологии производства, используемые на данный момент. О том, что вопрос безопасности был успешно решен, свидетельствует простой факт: эти ХИТ находятся в эксплуатации уже второе десятилетие. Каждый из нас сталкивается с ними ежедневно, пользуясь, например, мобильным телефоном, планшетным компьютером и т. д., не опасаясь никаких последствий. За 20 с лишним лет были выпущены сотни миллионов аккумуляторов. СОФ, входящая в состав батарей, также осуществляет функции безопасности, но в большей степени она служит продлению срока эксплуатации (балансировка батарей, недопущение разряда ниже определенного уровня, что существенно сказывается на сроке службы, и пр.) [2].

Для приготовления электролита Li-ion аккумулятора нужны растворители, не содержащие свободного протона и устойчивые в широком диапазоне потенциалов. При заряде аккумуляторов, использующих воду в качестве основы электролита, часть энергии, сообщаемой аккумулятору при заряде, расходуется на ее электролиз. При нормальной эксплуатации Li-ion аккумулятора такого разложения растворителя не происходит, и практически вся емкость, сообщенная аккумулятору при заряде, будет отдана им при разряде. То есть отношение отданной емкости при разряде к полученной емкости при заряде Li<sup>+</sup> аккумуляторов близко к единице. Аккумулятор получился герметичным.

По удельным характеристикам Li-ion аккумуляторы лидируют среди массово выпускаемых ХИТ и занимают одно из первых мест среди применяемых электрохимических систем. (Например, сопоставимые удельные характеристики имеют серебряно-цинковые аккумуляторы.) Li-ion аккумуляторы обладают высокой удельной энергией (до 190 Вт·ч/кг), высоким разрядным напряжением (3,4–4 В и более, в зависимости от используемых электродных материалов), очень низким саморазрядом (менее 3% в месяц) и длительным сроком службы (более 1000 циклов, при снижении отдаваемой емкости на 20% от номинальной к тысячному циклу, то есть 0,8Сн). В зависимости от материалов и конструкции эти аккумуляторы могут работать в интервале температур от –40 до +80 °С и разряжаться токами более 100Сн. При этом их стоимость постоянно снижается, а область применения расширяется.

На рис. 2 показаны возможные сочетания удельной энергии и удельной мощности различных аккумуляторов, а также суперконденсаторов и топливных элементов; на второй оси ординат показан ток, которым может разряжаться ХИТ (в долях от Сн). Самым высоким показателем удельной мощности обладают суперконденсаторы; хотя они запасают наименьшее количество энергии в сравнении с другими ХИТ, разрядные токи у них могут достигать сотен Сн. Затем идут свинцово-кислотные аккумуляторы различной конструкции и назначения (красные области), затем никель-кадмиевые и никель-металлгидридные ХИТ (зеленые области слева). В середине (желтая область) показаны так называемые тепловые ХИТ, источники, работающие при температуре в несколько сотен градусов, где электролитом служит расплав солей. Наибольшими удельными характеристиками обладают топливные элементы (зеленая область справа), однако их

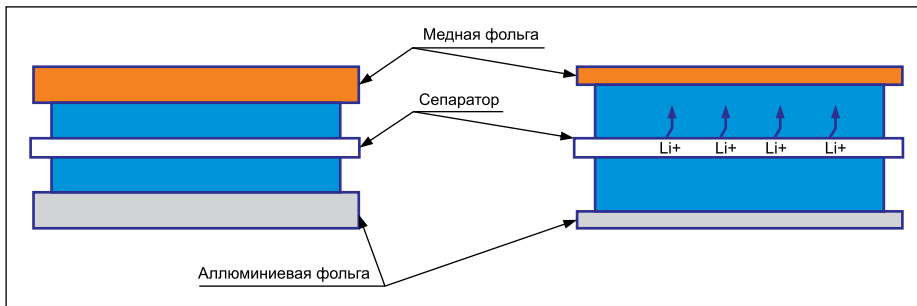


Рис. 3. Электродные массы и токоведущие части аккумулятора

нагрузочная способность низкая вследствие высокого внутреннего сопротивления.

Деление  $\text{Li}^+$  аккумуляторов на высоко-мощные, высокоемкие и промежуточные, занимающие место между двумя приведенными классами, носит условный характер (синие области). Суть этого разделения в следующем. Даже с учетом одного и того же электрохимического процесса сам аккумулятор, как конечное изделие, можно изготовить по-разному (рис. 3). Например, токопроводящую основу электрода (алюминиевая фольга на положительном электроде, медная — на отрицательном) в одном случае можно сделать тоньше и электродной массы нанести больше, а в другом — наоборот. Чем больше соотношение активных электродных масс, участвующих в электрохимических реакциях, к пассивным, не участвующим в них, тем выше удельные характеристики конечного изделия. Однако чем меньше толщина медной фольги, тем меньший ток она может пропустить, не перегреваясь при этом. И чем больше толщина слоя электродной массы, тем больше его сопротивление. То есть аккумулятор с более тонкой токопроводящей основой и более толстым слоем электродной массы будет иметь высокие показатели по запасаемой энергии, но низкую мощность, и наоборот. Для еще большего снижения сопротивления применяют активные материалы с меньшим размером частиц.

Варьируя толщину электродов, фольги, сепаратора и материалы положительного и отрицательного электрода, размеры частиц и пр., производители могут изготовить аккумулятор с различными максимальными токами разряда и/или различной емкости (в одном и том же типоразмере конечного изделия). Высокомощные аккумуляторы (с высокими токами разряда) должны иметь и более массивные токовыводы (борны), это предохраняет аккумулятор от перегрева при больших значениях тока. К тому же для увеличения тока разряда в состав электролита и активных масс можно вносить всевозможные добавки, увеличивающие проводимость. Все это еще больше снижает удельные показатели ( $\text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$ ,  $\text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{дм}^3$ ).

Высокоемкие аккумуляторы обычно имеют небольшие размеры борнов (токоъемников) в сравнении с объемом корпуса ак-

кумулятора. Такие борны рассчитаны на относительно малые токи разряда. Ток разряда/заряда удобно измерять и сравнивать не в абсолютных единицах, а в относительных. Ток привязывают к номинальной емкости аккумулятора  $\text{Сн}$ . Так, высокоемкие аккумуляторы разряжаются токами примерно до  $2\text{Сн}$ , а заряжаются до  $0,5\text{Сн}$ . Например, если аккумулятор имеет емкость  $10\text{ А}\cdot\text{ч}$ , то максимальный ток разряда составит  $20\text{ А}$  (получасовой режим).

Высокомощные аккумуляторы могут разряжаться токами до  $15\text{--}20\text{Сн}$ . (Отдельные представители этого класса могут разряжаться токами до  $40\text{Сн}$  и более.)

Высокоемкие и высокомощные аккумуляторы предназначены для разных задач и имеют различное назначение, хотя иногда их совместно эксплуатируют в одном изделии: одни для стартерных режимов, другие — для питания слаботочной аппаратуры.

Крупные производители бытовой электроники обычно не покупают аккумуляторы того или иного класса, а заказывают их изготовление, что существенно снижает затраты и позволяет получить именно то, что необходимо. Существует ряд фирм, которые могут разработать сам аккумулятор и испытать его по техническим требованиям заказчика,

после чего документацию отправляют на какой-нибудь завод-изготовитель, который выпускает несколько миллионов аккумуляторов.

При разработке учитывается практически все — средний ток и максимальный пиковый ток разряда, емкость (время активной работы прибора), габариты, место расположения внутри корпуса и тепловые нагрузки от плат и оборудования прибора, количество циклов заряд/разряд и пр. Количество циклов, как ни странно, влияет на стоимость, которая играет не последнюю роль. Действительно, зачем изготавливать аккумулятор, который не успеет выработать свой ресурс, как будет уже сдан в утилизацию вместе с прибором? Так, практически любое портативное приложение (например, мобильный телефон) устареет уже через год, а через 3–4 года его просто заменяют новым, современным. Аккумулятор за это время заряжают (если пересчитать на полный цикл заряд/разряд) всего 300–400 раз. Снизив ресурс аккумулятора (применив более дешевые материалы и технологии) до указанных значений (с запасом до 500), можно сэкономить, не закладывая «излишек» в изготавливаемое устройство. Обычно по этому пути идут производители дешевой электроники второго эшелона и «no name».

Конструктивно  $\text{Li}^+$  аккумуляторы можно разделить на два вида: по способу изготовления электродов и по конструкции корпуса аккумулятора. Конструкция блока электродов может быть рулонного типа или состоять из набора отдельных электродов (рис. 4).

Первая конструкция, как правило, используется для аккумуляторов небольшой емкости, вторая — для более крупных образцов. К достоинствам рулонной конструкции следует отнести небольшую трудоемкость изготовления: электроды с сепаратором скручиваются на специальной машине. Недостатки рулонной конструкции — плохой теплоот-

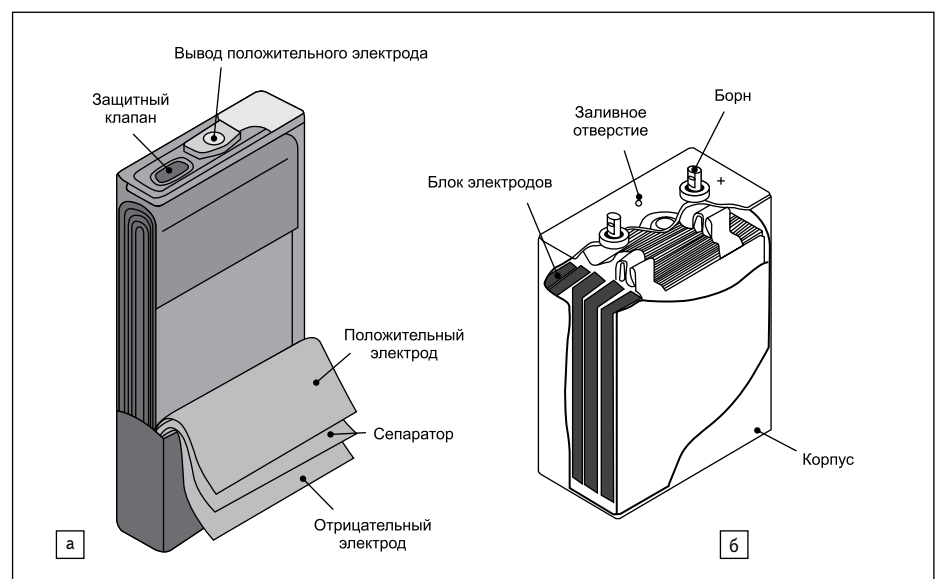


Рис. 4. Конструкции блока электродов: а) рулонная; б) из набора отдельных электродов

вод от электродов к корпусу аккумулятора из-за наличия сепаратора и электродных масс. Теплоотвод осуществляется в основном на узкий торец аккумулятора, как показано на рис. 4а. Это приводит к сложностям в создании аккумуляторов большой емкости такой конструкции, а также высокомоощных аккумуляторов, рассчитанных на отдачу большого тока длительное время.

Рулонная конструкция также может быть двух видов: закручивание электродов вокруг воображаемой пластины (рис. 4а) и цилиндр. Первый способ используется в основном для призматических аккумуляторов, при этом в одном корпусе может располагаться несколько рулонов, соединенных параллельно.

Конструкция, которая состоит из отдельных электродов, используется для изготовления призматических аккумуляторов (рис. 4б). При этом теплоотвод также в основном осуществляется с торцов электродов, поэтому для лучшего теплообмена электроды могут располагаться как вдоль широкой стенки корпуса (рис. 4б), так и поперек. Разработчики таким образом увеличивают площадь теплоотдачи, улучшая условия работы электродных масс.

Существует два вида цилиндрических аккумуляторов: с винтовыми борнами и с контактными площадками (рис. 5).

Достоинства цилиндрической конструкции — отсутствие изменения в объеме аккумулятора при длительном циклировании, так как здесь аккумулятор «дышит» (меняет немного свой объем при разряде/заряде), а стенки аккумуляторов других конструкций могут деформироваться. В цилиндрических аккумуляторах всегда используется рулонная конструкция электродов. К недостаткам такой конструкции следует отнести относительную сложность равномерной намотки большого рулона и плохой теплоотвод, поэтому цилиндрические аккумуляторы емкостью более 50 А·ч — редкость.

Винтовые борны применяются для улучшения условий токосъема (во избежание перегрева борнов) и используются в высокомоощных аккумуляторах и аккумуляторах большой емкости (более 20 А·ч). На рис. 5 (в центре, темно-желтые) показаны два цилиндрических аккумулятора, борны одного из которых имеют два винта, соединенных перемычкой. Хотя эти аккумуляторы примерно одинакового размера, их емкость отличается на 10 А·ч. Аккумулятор, борн которого имеет два винта, обладает меньшей емкостью (40 А·ч) и предназначен для работы с большим разрядным током.

К исключению можно отнести аккумулятор ANR26650M1A фирмы A123 (на рис. 5 в центре, левее белого аккумулятора фирмы SAFT). Этот образец не имеет винтовых борнов, только площадки для приваривания. Хотя такой аккумулятор может разряжаться токами до 35Сн (70 А), он относится в высокомоощным. Об этом можно судить по его размерам и емкости — при диаметре 26 мм



Рис. 5. Цилиндрические Li-ion аккумуляторы

его емкость составляет всего около 2 А·ч. Такой же емкостью обладает аккумулятор диаметром 18 мм (той же высоты, желтый, в центре на рис. 5).

Как показали испытания, при длительном постоянном токе разряда более 15Сн аккумулятор перегревается (из-за рулонной конструкции), даже если его поместить в теплоотводящий ложемент. Повторное использование аккумулятора (заряд/разряд) возможно только после его остывания, то есть через десятки минут.

Этот аккумулятор хорошо подходит для питания различных двигателей (электроинструмент и т. д.), где начальный стартовый ток велик (10–15Сн в течение секунды), а по мере раскручивания ротора падает до приемлемого уровня (2–3Сн). Применение аккумулятора в электроинструменте значительно улучшает динамику последнего, но налагает дополнительные требования к механической прочности его частей.

Аккумуляторы с контактными площадками предназначены для приваривания контактной сваркой перемычек или лепестков под пайку. Некоторые производители приваривают лепестки под пайку на заводе, о чем можно узнать в соответствующей документации. (Может быть несколько видов лепестков, например, под печатную плату, пайку под провод и т. д.) Самостоятельно припаивать аккумуляторы к контактным площадкам не рекомендуется: возможен местный перегрев корпуса, что может привести к оплавлению прокладок, не предназначенных для высоких температур. В результате аккумулятор потеряет герметичность, и произойдет вытекание электролита. Такая пайка может привести и к чрезмерному нагреву электродных масс и повышению скорости их деградации.

Типоразмер аккумуляторов цилиндрического типа обычно обозначается несколь-

кими цифрами. Один из самых распространенных — габарит 18650 (желтый, в центре на рис. 5). Здесь первые цифры обозначают диаметр, вторые — высоту цилиндра (диаметр — 18 мм, высота — 65 мм). У призматических аккумуляторов типоразмер состоит из трех цифр (В×Ш×Г, у различных производителей порядок может отличаться). Типоразмеры Li<sup>+</sup> аккумуляторов обычно отличаются от других типоразмеров ХИТ, например первичных, NiCd и NiMH. Это сделано для того, чтобы потребитель не смог случайно заменить элементы питания, имеющие напряжение 1,5 В, на аккумулятор, имеющий напряжение в два раза выше: 3,2–3,7 В.

Одним из исключений является французская фирма SAFT, выпускающая Li<sup>+</sup> аккумуляторы типоразмера D (аккумулятор в белой оболочке на рис. 5). Этот габарит используется, в частности, в марганец-цинковых элементах для бытовых устройств, однако конструктивно аккумулятор выполнен так, что его невозможно напрямую вставить в такие устройства или подсоединить к ним (немного другая конструкция контактных площадок).

Призматические аккумуляторы также изготавливаются двух видов: с винтовыми борнами и для приваривания лепестков или перемычек (рис. 6).

Два аккумулятора в синей оболочке имеют рулонную конструкцию, меньший — емкостью 1,5 А·ч — один рулон, больший — 10 А·ч — это восемь небольших рулонов, соединенных электрически параллельно.

Для снижения стоимости производства некоторые компании изготавливают борны под клепку (крайний справа на рис. 5), лепестки для припаивания заклепаны непосредственно в борн. Такие аккумуляторы применяются для питания электровелосипедов, широко распространенных в Юго-Восточной Азии. На заднем плане на рис. 6



Рис. 6. Призматические Li-ion аккумуляторы

изображен желтый аккумулятор емкостью 90 А·ч, имеющий пластмассовый корпус и борны с внутренней резьбой. Несмотря на толстые стенки (несколько миллиметров), он обладает достаточной прочностью, и его изготовление обходится дешевле, чем корпусов из нержавеющей стали, которые необходимо сваривать лазером.

Следует заметить, что все материалы корпуса, используемые для изготовления конструкции аккумулятора, должны быть нейтральны (то есть они не должны участвовать в электрохимических реакциях). К ним относятся всевозможные прокладки, уплотнители, заклепки, закрывающие заливочное отверстие после сборки, предохранительные клапаны, сам корпус и т. д.

В последнее время большое распространение получили аккумуляторы в корпусе из ламинированной фольги (рис. 7). Полимерный электролит в таких аккумуляторах находится в гелеобразном состоянии (загущен), из-за этого их часто называют гелеполимерными. Электрохимические процессы, идущие в них, ничем не отличаются от описанных выше, однако применение загущенного электролита позволяет поместить весь состав аккумулятора в герметично заваренный пакет. Так как оболочка аккумулятора весит значительно меньше, чем корпуса цилиндрических и призматических аккумуляторов, они обладают наибольшей удельной энергией (190 Вт·ч/кг и более). Такие аккумуляторы разнообразны по габаритам, потому что корпус им не нужен.

В качестве недостатков следует отметить низкую механическую прочность и более узкий диапазон температур ( $-20...+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), что обусловлено самой конструкцией гелеполимерного аккумулятора. При изготовлении аккумулятора с более широким рабочим температурным диапазоном необходимо добавлять в электролит фракции, которые

могут испаряться при температуре выше  $+50...+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Если жесткий корпус аккумуляторов других видов не дает таким фракциям влиять на габариты, то полимерный аккумулятор просто может раздуться.

Токовыводы у аккумуляторов этого типа делают из тонкой полоски металла. Чтобы собрать из аккумуляторов батарею, в токовыводах делают отверстия или специальные вырезы для болтового соединения. Выводы аккумуляторов небольшой емкости припаивают на специально изготовленной печатной плате или соединяют контактной сваркой. Если аккумулятор всего один и находится внутри устройства или прибора, провода к нему просто припаивают.

Конструктивно ламинированные аккумуляторы также можно разделить на два типа: в первом токовыводы находятся с одной стороны, а во втором — с противоположных. На рис. 7 почти все модели имеют токовыводы с одной стороны, лишь крайний справа аккумулятор имеет токовыводы с противоположных сторон. Расположение выводов с противоположных сторон предпочтительнее при высоких токах разряда, так как происходит более равномерное распределение токов в электродных массах, что способствует меньшему нагреву и увеличивает жизненный цикл самого аккумулятора.

Ламинированные аккумуляторы, благодаря своей мобильности в изменении типоразмера на производстве и технологичности, получили широкое распространение, и без них невозможно уже представить устройство планшетов и всевозможных мобильных устройств. На рис. 7 представлены аккумуляторы различной емкости: нижний (зеленый) — на 100 А·ч, затем по убыванию — на 35 и 17 А·ч (с токовыводами с противоположных сторон), 10, 5,5, 2,2 и 1,05 А·ч.

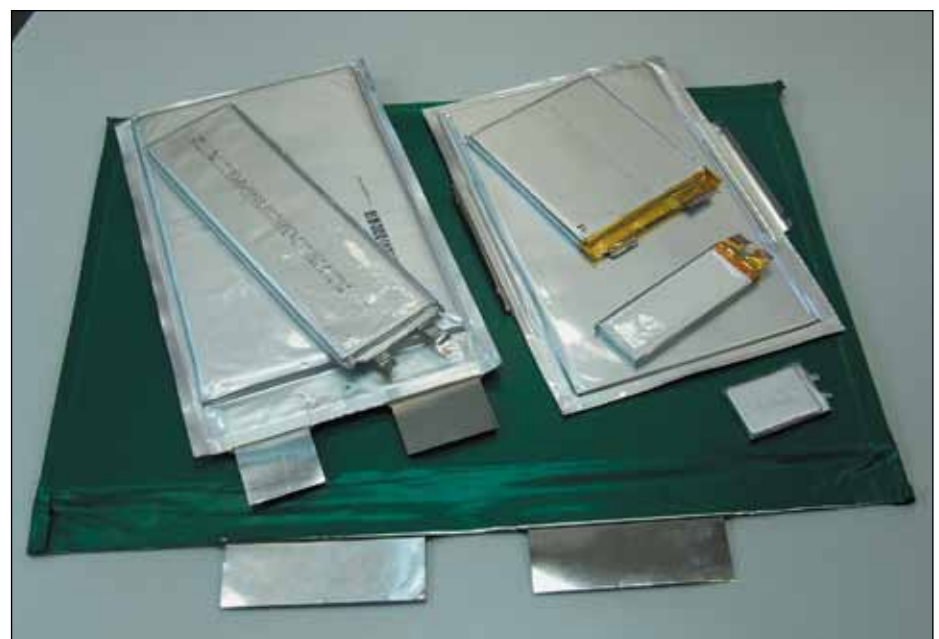


Рис. 7. Аккумуляторы в корпусе из ламинированной фольги

Безопасная эксплуатация  $\text{Li}^+$  аккумуляторов учтена и в их конструкции: все корпусные аккумуляторы снабжены предохранительными клапанами. При превышении давления внутри корпуса клапан разрывается и сбрасывает давление наружу, предотвращая накопление давления внутри и разрушение корпуса. Предохранительные клапаны чаще всего изготавливают из тонкой металлической фольги с насечками, которая выдерживает определенное давление. Однако бывают и пружинные конструкции: такой клапан сбрасывает часть давления и может закрыться снова.

В небольших цилиндрических аккумуляторах клапан находится непосредственно под токовыводом (рис. 8). Некоторые производители снабжают свои аккумуляторы самовосстанавливающимся предохранителем (в виде круглой «таблетки»), который завальцовывается непосредственно под токовыводом. Такая конструкция и применение предохранителя изначально были предусмотрены в цилиндрическом аккумуляторе типоразмера 18650 (на рис. 8 слева). Однако в последнее время в связи со значительными успехами в технологии и материаловедении их практически не используют. Это связано и с тем, что производитель аккумуляторов в данном случае зависит от компании, выпускающей такие предохранители: при изменении конструкции необходимо будет менять и размеры предохранителя. Поэтому решение вопроса — применять предохранитель или нет — возлагается на проектировщиков электронных устройств и батарей, где они используются (рис. 1).

На аккумуляторах цилиндрической формы большой емкости (от 7 А·ч) предохранительный клапан может располагаться как с торца (со стороны борна), так и на самом



**Рис. 8.** Вырезы для аварийного сброса внутреннего давления

цилиндрическом корпусе. У призматических аккумуляторов клапан обычно находится между борнами и/или сверху (рис. 4). В любом случае при эксплуатации и установке аккумуляторов в корпус или изделие нельзя закрывать этот клапан элементами конструкции (платами, стягивающими элементами и т. д.).

Во всех описанных нами конструкциях аккумуляторов могут применяться различные материалы, представляющие собой как положительный, так и отрицательный электрод. Рассмотренная в начале статьи электрохимическая реакция по переносу иона лития (с кобальтатом лития) — не единственная из возможных. Есть и другие. Однако аккумуляторы с электродами из других матери-

лов и переносом иона лития также будут относиться к классу Li-ion.

О материалах, применяемых в Li-ion аккумуляторах, их достоинствах и недостатках мы расскажем в следующей статье цикла. ■

*Продолжение следует*

### Литература

1. Таганова А. А., Бубнов Ю. И., Орлов С. Б. Герметичные химические источники тока: элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации: Справочник. СПб.: Химиздат, 2005.
2. Рыкованов А. С. Элементная база систем обеспечения функционирования Li-ion аккумуляторов // Компоненты и технологии. 2012. № 8.