

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шишкин С.А. Реактивная мощность потребителей и сетевые потери электроэнергии // Энергосбережение № 4. 2004.
2. Регулятор реактивной мощности с аналоговым вычислителем. Республика Беларусь / ПАТЭНТ на карыснуюмадэль № 8066 / Аутар Ярошевич А.В. / Зарэгістравана у Дзяржаунымрэестрыкарысныхмадэляу 2011.12.15.
3. А.В.Ярошевич. Схема компенсации реактивной мощности в квартирных электрических сетях // Вестник Брестского государственного технического университета - Физика, математика, информатика. Вып.5(71) – Брест: БрГТУ. 2011. С.66-67.

УДК 621.9

## СТЕНД ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

**В. Н. Кохнюк, А. Н. Дробов, А. А. Паршутто, И. П. Смягликов,  
С. И. Багаев, А. А. Изюмов**

Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск,  
Республика Беларусь

В настоящее время происходит интенсивное развитие и использование электротранспорта и электронных устройств, в состав которых входят литий-ионные аккумуляторы (ЛИА). Ресурс аккумуляторов в зависимости от типа составляет 500–1000 циклов «заряд-разряд», что обеспечивает устройства энергией, необходимой для их функционирования, в течение 3–6 лет. После этого ЛИА не могут быть использованы по прямому назначению и должны утилизироваться. По прогнозам к 2030 гг. только электротранспорта будет выпущено около 100 млн единиц, соответственно количество отработанных ЛИА будет сопоставимо и с каждым годом актуальность проблемы их утилизации будет возрастать.

Литий-ионные аккумуляторы представляют собой сложные системы, в состав которых входят такие металлы, как кобальт, никель, литий и др., поэтому отработанные ЛИА рационально не просто утилизировать, а подвергать переработке с целью извлечения указанных материалов и повторного их использования в промышленности. Для переработки ЛИА применяются пирометаллургические и гидрометаллургические способы, а также различные их сочетания [1, 2].

При пирометаллургическом процессе отработанные ЛИА перерабатываются при высокой температуре (до 1500 °С) без какой-либо предварительной механической обработки, во время которой оксиды металлов восстанавливаются до сплава кобальта, меди, железа и никеля. При этом такие металлы, как алюминий и литий, теряются в шлаке, а пластик и другие органические компоненты сгорают. Извлечение материалов из ЛИА в указанном процессе составляет 30–40 %.

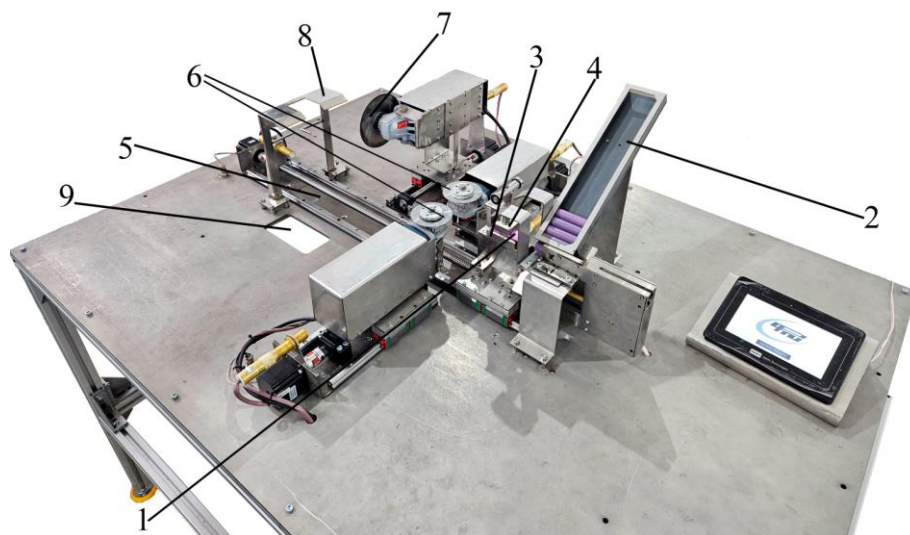
Гидрометаллургический способ основан на химическом растворении компонентов ЛИА с последующим выделением их в виде малорастворимых соединений, например, сульфидов, гидроксидов или карбонатов металлов. Извлечение материалов ЛИА в таком процессе составляет 70–90 %. При гидрометаллургическом способе переработки предварительно необходимо вскрытие корпуса аккумулятора. На сегодняшний момент для этого широко применяют механическое измельчение ЛИА с использованием шредеров, шаровых мельниц, молотковых или роторных ножевых дробилок. В результате измельчения получается смесь частиц разной природы (сталь, электродный материал, металлические фольги (алюминий, медь), пластик, графит и электролит), которую для дальнейшей переработки необходимо разделить на составляющие. Сначала удаляется электролит из электродных материалов, например, путем термической обработки при температуре около 100 °С под вакуумом (при этом происходит испарение органических растворителей с последующей конденсацией). Далее измельченные частицы подвергают разделению на фракции. Способы разделения основываются на использовании различных свойствах частиц в смеси: магнитной восприимчивости, размеров и плотности частиц, гидрофильности и др. От полученной смеси (стальной корпус, электродный материал, металлические фольги, пластик, графит) отделяют частицы корпуса с помощью магнитной сепарации. Для повышения степени разделения магнитную сепарацию, как правило, проводят несколько раз. Для отделения из смеси пластика используют электростатическую или воздушную сепарацию. Металлические фольги отделяют от электродного материала просеиванием с применением сит разных размеров. Например, при использовании вибрационных сит с размером ячеек 3 мм и 500 мкм получаемая фракция > 3 мм подвергается магнитной сепарации. В основном эта фракция состоит из металлических (железо, алюминий, медь) и пластиковых частиц. Фракция < 3 мм, содержащая, в основном, электродный материал и графит, дополнительно разделяется с использованием 500 мкм сит. Фракция > 500 мкм богата медью и алюминием. Фракция < 500 мкм богата кобальтом, никелем и марганцем. В этой фракции также содержатся соединения лития и графит. Графит отделяют от электродного материала с помощью флотации или удаляют пиролизом – сжигают при высоких температурах (до 1500 °С). Оставшийся электродный материал, т. н. «черное вещество», собирается и передается на операцию гидрометаллургической обработки для выделения кобальта, никеля, лития и марганца (в виде солей или гидроксидов).

Процесс переработки ЛИА гидрометаллургическим методом с предварительным механическим измельчением характеризуется многостадийностью и включает в себя операции просеивания, магнитной и электростатической сепарации, тонкого дробления с получением магнитной металлической фракции (железо), немагнитной металлической фракции (алюминий, медь), концентрированного электродного материала, пластика и графита.

Альтернативным способом извлечения электродных материалов при гидрометаллургическом процессе переработки ЛИА является прямая разборка корпуса и последующее разделение анодного и катодного электрода-фольги целиком (не разрушая целостности электродов). Преимущество прямой разборки корпуса ЛИА перед полным измельчением аккумулятора состоит в уменьшении количества операций последующего разделения компонентов ЛИА друг от друга, а также повышении степени чистоты (снижение концентрации инородных примесей) каж-

дой отдельной фракции компонентов ЛИА и электродного материала в частности. К сожалению, использование такого способа в крупномасштабных объемах ограничено, так как разборка корпуса ЛИА на сегодняшний момент осуществляется вручную и успешно реализована в лабораторных условиях [2].

Целью работы является автоматизация процесса прямой разборки корпуса ЛИА тип 18650, которая позволит эффективно и безопасно разделять компоненты ЛИА на отдельные составляющие. Для достижения поставленной цели был разработан и изготовлен стенд для автоматической разборки корпуса ЛИА (рисунок 1). Программная часть реализована на базе микроконтроллера STM32F401 с использованием операционной системы реального времени FreeRTOS. Управление стендом осуществляется с помощью сенсорной панели оператора. Разработанное программное обеспечение позволяет варьировать глубину (200–300 мкм) и скорость резания (10–200 мм/мин), что позволяет разрезать корпус ЛИА с сохранением целостной структуры электродных материалов упакованных в виде рулона.

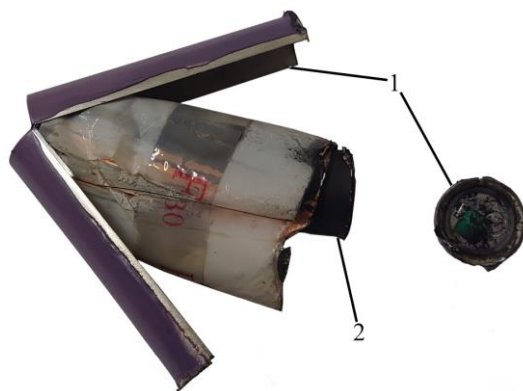


**1 – ЛИА, 2 – загрузочный бункер, 3 – каретка, 4 – прижимной механизм, 5 – направляющая, 6 – прорезные фрезы, 7 – отрезная фреза, 8 – выталкиватель, 9 – приемное окно**

**Рисунок 1 – Стенд извлечения электродных материалов из ЛИА тип 18650**

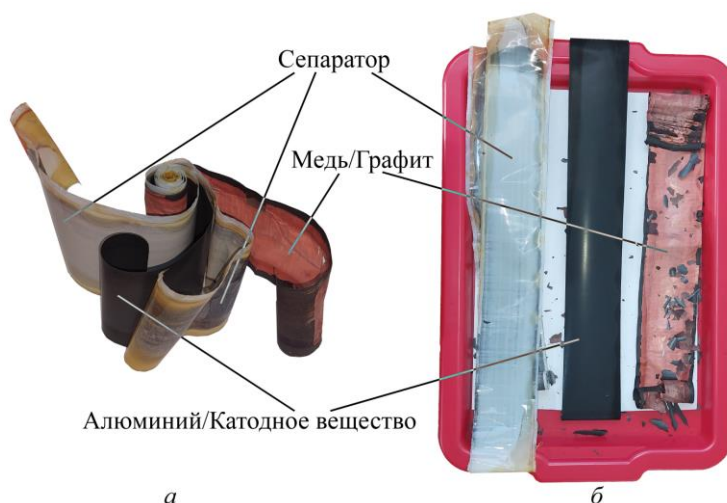
Процесс обработки ЛИА осуществляется следующим образом. На первом этапе происходит автоматический забор предварительно разряженных ЛИА (1) из загрузочного бункера (2) в каретку (3) с прижимным механизмом (4). Далее каретка на холостом ходу по направляющей (5) движется к прорезным фрезам (6). При приближении к фрезам скорость изменяется до рабочей и происходит продольное разрезание корпуса ЛИА. После окончания операции на холостом ходу каретку с ЛИА движется к фрезе (7). При достижении заданной позиции каретка останавливается и происходит отрезание торца ЛИА. Далее на холостом ходу каретка движется к выталкивателю (8), где ЛИА выбрасывается через приёмное окно (9) в емкость для готовой продукции. После чего каретка возвращается в исходное положение. Сверху рабочая зона закрыта защитным кожухом с подключенной вытяжной вентиляцией.

В результате получается разрезанный корпус, из которого легко извлечь электродные материалы в виде рулона (рисунок 2).



**1 – части корпуса, 2 – электродные материалы в виде рулона**  
**Рисунок 2 – Распиленная и разобранный батарея**

При дальнейшей переработке извлеченный из корпуса рулон разматывается на составляющие в виде лент (рисунок 3). Ленты складываются отдельно в зависимости от материала основы (алюминий, медь, пластик) и обрабатываются по отдельности. Такой подход упрощает процесс последующей переработки ЛИА из-за снижения количества примесей и промежуточных операций.



**Рисунок 3 – Литий-ионный аккумулятор после разборки (а) и размотки (б)**

Таким образом, разработанный стенд упрощает отделение электродных материалов от корпуса литий-ионного аккумулятора, что позволяет обрабатывать до 25 изделий в час при обеспечении высокой точности реза.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. A comprehensive review of li-ion battery materials and their recycling techniques / Hee-Je Kim [et al.] // Electronics. – 2020. – V. 9. – P. 1161–1205.
2. Jena, K. Kishore Comprehensive Review on Concept and Recycling Evolution of Lithium-Ion Batteries (LIBs) / Kishore K. Jena, Akram Al Fantazi, Ahmad T. Mayyas // Energy Fuels. – 2021. – V. 35. – P. 18257–18284.