

**В. А. Зеленин¹, А. Т. Волочко¹, Д. А. Патоцкий², С. Н. Янкевич², И. Н. Хроль²,
И. В. Подорожная²**

¹*Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

²*ОАО «Приборостроительный завод «Оптрон», Минск, Республика Беларусь*

ТОКОПРОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ШИН МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ ТЯГОВЫХ БАТАРЕЙ

Аннотация. Рассмотрены вопросы выбора материалов для соединительных шин тяговых батарей (ТБ). Экспериментально установлены оптимальные параметры их точечной сварки с элементами питания: первый импульс с силой тока 7 кА длительностью 1 мс, перерыв между импульсами 1 мс, второй импульс с силой тока 7 кА длительностью 2 мс. При работе ТБ на электротранспорте сопротивление соединительных шин не должно приводить к нагреву элементов питания во избежание перегрева выше 60 °С. В большинстве современных ТБ, состоящих из литий-ионных элементов, для соединения используется никелевая лента. Для обеспечения свариваемости материалов (медь–никель или никель–никель) важно, чтобы при краткосрочном импульсе тока в зоне сварки была достигнута рабочая температура. Один из вариантов решения данной задачи – это нанесение металлического покрытия. Проведены эксперименты по свариваемости различных материалов, в том числе с нанесенными покрытиями. Наилучшие результаты по свариваемости показала шина из луженой меди, которую приваривали к никелевым пластинам, эмитирующим корпус элемента питания. Проведены испытания на разрыв сваренных образцов. Предел прочности на разрыв исходных шин меди составил 340–450 МПа. При сваривании пластин медь–никель и медь (луженая) – никель показатели предела прочности достигли 70 % от прочности исходной медной пластины. На основании полученных экспериментальных данных изготовлена опытная партия аккумуляторных ТБ, которая успешно прошла испытания на соответствие техническим требованиям по прочности и величине переходных сопротивлений сварных соединений соединительных шин с элементами питания.

Ключевые слова: электрическое транспортное средство, аккумуляторная батарея, элементы питания, точечная сварка, соединительные шины

Для цитирования: Токопроводящие материалы для соединительных шин многоэлементных аккумуляторных тяговых батарей / В. А. Зеленин [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2021. – Т. 66, № 3. – С. 280–287. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-280-287>

**Victor A. Zelenin¹, Alexander T. Volochko¹, Denis A. Patotsky², Stsiapan N. Yankovich², Igor N. Khrol²,
Irina V. Podorozhniaya²**

¹*Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*JSC “Instrument-Making Plant “Optron”, Republic of Belarus*

CONDUCTIVE MATERIALS FOR CONNECTING TIRES OF MULTI-ELEMENT ACCUMULATOR TRACTION BATTERIES

Abstract. The article deals with the choice of materials for connecting tires of traction batteries (TB). The optimal parameters of their spot welding with batteries are experimentally established (the first pulse with a current of 7 kA duration of 1 ms, the break between the pulses of 1 ms, the second pulse with a current of 7 kA duration of 2 ms). When operating the traction battery on electric vehicles, the resistance of the connecting tires should not lead to heating of the batteries in order to avoid overheating above 60 °C. In most modern TB, consisting of Li-ion elements, a nickel tape is used for the connection. To ensure the weldability of materials (copper–nickel or nickel–nickel), it is important that the operating temperature is reached at a short-term current pulse in the welding zone. One of the solutions to this problem is the application of a metal coating. Experiments were conducted on the weldability of various materials, including those with applied coatings. The best results in weldability were shown by tires made of tinned copper, which was welded to nickel plates (emitting the battery body). Tear tests of the welded samples were carried out. The tensile strength of the original copper tires was 340–450 MPa. When welding copper–nickel and copper(tinned) – nickel plates, the strength limit values reach 70 % of the strength of the original copper plate. On the basis of the obtained experimental data, a pilot batch of battery TB was manufactured, which successfully passed tests for compliance with the technical requirements for the strength and the value of the transition resistances of the welded joints of connecting buses with batteries.

Keywords: electric vehicle, battery, batteries, spot welding, connecting tires

For citation: Zelenin V. A., Volochko A. T., Patotsky D. A., Yankovich S. N., Khrol I. N., Podorozhniaya I. V. Conductive materials for connecting tires of multi-element accumulator traction batteries. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 3, pp. 280–287 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-280-287>

Введение. Развитие электротранспорта в настоящее время приобрело массовый характер. Ведущие мировые научные центры занимаются вопросами развития и усовершенствования электротранспорта и его комплектующих [1, 2].

Учитывая мировые тенденции, сотрудниками ОАО «Приборостроительный завод «Опэрон» проведена научно-практическая работа по усовершенствованию компонентной базы электротранспорта в Республике Беларусь. В научно-исследовательском отделе организации разработаны конструкторская документация на лабораторную установку точечной контактной сварки, методика сравнения и классификации материалов, технология точечной сварки соединительных шин с элементами питания тяговых батарей (ТБ), методика контроля качества сварных соединений, лабораторная установка для точечной сварки, изготовлены макетный образец установки и опытная партия ТБ.

Основной проблемой при сборке аккумуляторных ТБ является надежная коммутация элементов питания. Для ее решения требуется обеспечение надежного соединения элементов питания с токопроводящими соединительными шинами. Актуальность решаемой проблемы обусловлена необходимостью повышения надежности и срока службы ТБ.

Целью работы являлся выбор материалов соединительных шин и проведение их точечной сварки с элементами питания ТБ. Помимо осуществления процесса точечной сварки необходимо было проведение металлографических исследований и проверка прочностных характеристик сварных швов (испытания на разрыв).

Процессы точечной контактной, ультразвуковой и лазерной сварки элементов питания с токопроводящими шинами. Одной из задач, требующих решения при изготовлении ТБ, является коммутация элементов питания при сборке, прежде всего обеспечение надежного соединения элементов питания с токопроводящими соединительными шинами с минимально возможными переходными сопротивлениями. В качестве элементов питания ТБ чаще всего используют элементы формата 18650 – литий-ионные (Li-ion) аккумуляторы с диаметром 18 мм и длиной 650 мм. Основными методами соединения элементов питания являются ультразвуковая сварка, пайка, лазерная и точечная сварка. Способ изготовления ТБ зависит от производителя электромобилей. Построение системы с меньшим количеством больших элементов питания (BMW, Германия) упрощает технологию их соединения, но ограничивает гибкость конструкции ТБ. Более сложные аккумуляторные системы (Tesla, США) повышают надежность ТБ.

Установлено, что для снижения тепловых потерь и исключения вероятности перегрева элементов питания до температуры выше 60 °С сопротивление контакта элемента питания с корпусом из никеля с токопроводящей шиной должно быть не выше 0,005 Ом [1–3]. При токах разряда ТБ до 18 А (кратковременных до 35 А) наиболее приемлемым является использование в качестве токопроводящих шин никелевой ленты сечением 0,2 × 10 мм, а наиболее эффективным и быстрым методом сварки – точечная сварка, поскольку сварное соединение Ni–Ni формируется в этом случае в течение нескольких миллисекунд и элемент питания в точке контакта не успевает нагреться до критических температур.

Использование ультразвуковой сварки позволяет получить соединения с требуемыми параметрами, однако из-за большей продолжительности процесса требуются дальнейшие исследования для установления частоты и минимально допустимой амплитуды колебаний, исключающих перегрев элементов питания при сборке ТБ.

Лазерная сварка позволит автоматизировать процесс сборки ТБ в крупносерийном производстве и обеспечит требуемое повышение их характеристик и надежности. Целесообразно применять этот метод сварки при формировании соединения перемычек к отрицательному электроду (корпусу) наиболее широко используемых литий-ионных элементов питания 18650, поскольку эти контакты наиболее чувствительны к перегреву.

Ультразвуковую сварку рационально использовать при получении контактов перемычек к положительному электроду элементов питания, который изолирован от корпуса воздушным зазором, а лазерную сварку – для контактов перемычек с отрицательным полюсом элементов питания.

Классификации материалов соединительных токопроводящих шин и покрытий по применимости при изготовлении различных типов тяговых батарей. При выборе материала и покрытий соединительных шин ТБ основным параметром является электропроводность, которая характеризует способность тела проводить электрический ток, или обратная ей величина – сопротивление. Сопротивление соединительных шин не должно приводить к нагреву элементов питания во избежание перегрева выше 60 °С. В большинстве современных ТБ, состоящих из Li-ion-элементов, для соединения используется никелевая лента. С помощью точечной (контактной) сварки отрезки ленты приваривают к полюсам элементов питания, соединяя их в ТБ. Используя определенную схему соединения, можно суммировать нужные параметры отдельных источников и получить групповой накопитель с более высоким напряжением или емкостью либо с комбинацией этих параметров [2, 3].

Использование никелевой ленты обусловлено следующими свойствами:

достаточно низкое удельное сопротивление ($8,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м);

низкая теплоемкость (460 Дж/кг), препятствующая перегреву проводника;

высокая прочность на разрыв (450 МПа) и пластичность;

высокая стойкость к коррозии и окислению.

Технологичность никелевой ленты обеспечивается ее профилем (прямоугольное сечение толщиной от 0,127 до 0,20 мм, шириной от 5 до 10 мм), что позволяет устойчиво расположить ее на плоских поверхностях плюсов элементов питания. Малая толщина ленты обеспечивает небольшие габариты готовой батареи [4].

Наблюдаются следующие трудности при сварке никелевых шин:

1) при сварке никеля и никелевых сплавов расплавленный металл хорошо растворяет водород, кислород и углекислый газ (при остывании растворимость газов существенно снижается), что может стать причиной образования пор и других дефектов в сварном соединении;

2) кислород при сварке вступает в реакцию с никелем и образует оксид NiO, который затрудняет сварку.

Положенный в основу разработки новых систем коммутации и технологии изготовления ТБ подход основан на использовании токопроводящих шин и перемычек из материалов на основе меди с удельной электропроводностью в 4–5 раз более высокой, чем у шин из никелевой ленты. Идея использования токопроводящих ленточных шин из меди не нова, однако ее реализация требует решения ряда сопутствующих задач. Первоочередной из них является задача повышения прочности и снижения величины переходного сопротивления сварных соединений Cu-Ni.

Медь – малоактивный металл, она не взаимодействует с водой, растворами щелочей, соляной и разбавленной серной кислотой, при этом обладает достаточно высокой стойкостью к коррозии [5]. Однако во влажной атмосфере, содержащей углекислый газ, медь покрывается зеленоватым налетом основного карбоната меди. Кроме того, примеси резко снижают электрическую проводимость. Присутствие в меди 0,02 % алюминия снижает ее электрическую проводимость почти на 10 %. Еще более резко возрастает сопротивление меди в присутствии неметаллических примесей [6].

К основным свойствам медных сплавов, оказывающим влияние на процесс сварки, относятся температура плавления, коэффициент температурного расширения, а также электро- и теплопроводность. Некоторые легирующие элементы значительно уменьшают электро- и теплопроводность меди [5, 7].

Присутствие в медном сплаве таких элементов, как цинк, кадмий и фосфор (которые имеют низкую температуру кипения), в процессе сварки может привести к пористости. Минимизация данного явления может быть достигнута за счет более высокой скорости сварки или использования меньшего количества присадочных материалов [8].

В меди и ее сплавах часто присутствует небольшое количество летучих, токсичных легирующих элементов. В результате требования эффективной системы вентиляции для защиты сварщика или оператора сварочной установки являются очень важными [5].

В научно-исследовательском отделе ОАО «Приборостроительный завод «Оптрон» разработана методика сравнения и классификации материалов соединительных токопроводящих шин и покрытий по применимости при изготовлении различных типов АКБ.

Методика проведения исследований. Размеры токопроводящих шин ($b \times h$) составляли: из Ni или из Fe с покрытием Ni – $6,9 \times 0,1$ мм; из меди марки М1 – $10,6 \times 0,2$ мм.

Корпуса элементов питания, как правило, изготавливают из никеля, но они могут быть выполнены из стали с гальваническим покрытием никелем.

После сварки элементы питания разрезали в зоне сварки (в плоскости, перпендикулярной соединению) и приготавливали шлифы с помощью установок «НЕРИС» моделей 3881Б и 3881 для последующего травления. В качестве полировальной смеси использовали смесь оксида хрома с водой.

В качестве травителя применяли раствор следующего состава: 5 г хлорного железа, 15 мл соляной кислоты и 60 мл воды.

Исследования микроструктуры проводили на металлографическом комплексе на основе микроскопа МИКРО-200 («Планар», Россия), соединенного в единую систему с фотокамерой и платой видеозахвата с выводением изображения на монитор компьютера (диапазон увеличений 100–2000 крат).

Количественную металлографию осуществляли на том же металлографическом комплексе МИКРО-200 с использованием программы ImageSP.

Механические испытания. Испытания на растяжение проводили по ГОСТ 1497-84 на разрывной машине MC WDW-100E.

Обработка экспериментальных данных выполнялась с использованием методов математической статистики, основываясь на законе нормального распределения значений. В качестве оценки математического ожидания использовалось среднее арифметическое. При анализе допустимых случайных отклонений от среднего значения ориентировочная доверительная вероятность составила 0,95. Отсев сомнительных результатов осуществлялся по критерию Романовского. Достоверность результатов обеспечивалась дублированием экспериментов. Для построения одной точки на графике проводилось не менее трех (как правило, пять) параллельных замеров. Относительная погрешность измерения не превышала 5 %.

Исследование свариваемости пластин с разными покрытиями. Точечную сварку осуществляли со следующими технологическими параметрами, обеспечивающими получение прочных сварных соединений между шинами из никеля: первый импульс с силой тока 7 кА длительностью 1 мс; перерыв между импульсами 1 мс; второй импульс с силой тока 7 кА длительностью 2 мс.

Принимая во внимание, что при точечной контактной сварке соединительных шин и элементов питания есть ограничения в виде недопущения перегрева АКБ в зоне сваривания, импульс должен быть краткосрочным. Для обеспечения свариваемости материалов (медь–никель или никель–никель) важно, чтобы при краткосрочном импульсе тока в зоне сварки была достигнута рабочая температура. Достичь рабочей температуры возможно за счет увеличения электросопротивления в зоне сварки. Однако это противоречит тому, что соединительные шины должны иметь минимальное сопротивление. Решение данной задачи возможно с помощью нанесения покрытия, которое создаст нужное электрическое сопротивление и сгорит в процессе сварки.

В первом опыте проводили точечную сварку медной шины, покрытой слоем олова, с никелевой шиной. Покрытие из олова располагали между никелевой и медной шинами, а сварочные электроды устанавливали на медную шину. При сварке происходил сильный разогрев медной шины с образованием оксидов меди (рис. 1, на образце 1 видны следы термического воздействия), однако ее схватывания с шиной из никеля не происходило.

Во втором случае сварочные электроды устанавливали на слой олова. При сварке медная шина также нагрелась (рис. 1, на образце 2 видны следы термического воздействия), однако хорошей свариваемости медной и никелевой шин также не наблюдалось.

В случае замены покрытия из олова никелевым были получены аналогичные результаты (рис. 1, на образце 3 слой никеля окислился).

В последующих экспериментах, принимая во внимание, что при эксплуатации ТБ возможно окисление шин из меди и снижение их проводимости, было проведено лужение медных шин оловом. Для лужения в качестве припоя использовали олово и флюс HR-500-LK (производство компании RUSFLUX), медную пластину перед припоем покрывали канифолью.



Рис. 1. Внешний вид медной шины после точечной контактной сварки: 1 – шина со слоем олова снизу; 2 – шина со слоем олова сверху; 3 – шина со слоем никеля сверху; 4 – сваренные луженая медная и никелевая шины

Fig. 1. Appearance of a copper tire after spot contact welding: 1 – a tire with a layer of tin on the bottom; 2 – a tire with a layer of tin on top; 3 – a tire with a layer of nickel on top; 4 – welded tinned copper and nickel tires

Установлено, что при сварке луженных оловом шин по указанным режимам формируются прочные сварные соединения как с никелевыми шинами, так и с полюсами элементов питания. Луженая медь имеет высокую пластичность, отлично поддается механической обработке, прочностные качества соответствуют техническим требованиям.

По результатам проведенных испытаний можно сделать следующие выводы: при токах разряда АКБ до 18 А (кратковременных до 35 А) наиболее приемлемым является использование в качестве токопроводящих шин никелевой ленты сечением $0,8 \times 10$ мм, а наиболее эффективным и быстрым методом сварки – точечная сварка, поскольку сварное соединение никель–никель формируется в этом случае в течение нескольких миллисекунд и элемент питания в точке контакта не успевает нагреться до критических температур [9, 10]. При токах разряда выше 20 А целесообразно использование в качестве токопроводящих шин материалов на основе меди, имеющих в 4–5 раз более высокую удельную электропроводность [11].

Металлографические исследования сварных соединений. Структура зоны сварки медной и никелевой шин представлена на рис. 2. Медь и никель при сплавлении образуют непрерывный ряд твердых растворов. Однако четкая граница раздела между медью и никелем свидетельствует о том, что образования твердого раствора в течение 3 мс сварки не происходит. В зоне расположения сварочного электрода граница раздела смещается на 20–30 мкм в сторону никелевой шины.

Микроструктура зоны сварки луженой медной и никелевой шин представлена на рис. 3. На нетравленном образце видно (рис. 3, а), что между медной шиной и слоем олова, а также между слоем олова и никелевой шиной имеются четкие границы раздела. После травления шлифа в областях границ раздела выявляются переходные зоны (рис. 3, b–d).

Поскольку олово при температуре выше 250°C хорошо растворяется как в меди, так и в никеле, наиболее вероятно, что переходные слои в зоне сварных соединений представляют собой твердые растворы олова соответственно в меди и никеле.

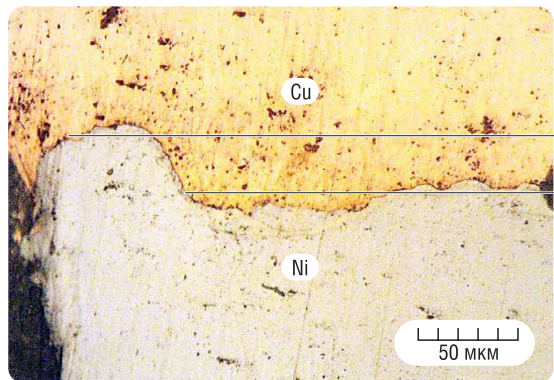


Рис. 2. Структура зоны сварки медной и никелевой шин (без травления)

Fig. 2. Structure of the welding zone of copper and nickel tires (without etching)

Испытание на разрыв сварных соединений. В Физико-техническом институте НАН Беларуси проведены испытания на разрывной машине MC WDW-100E на разрыв сваренных образцов. Результаты испытаний представлены в таблице и на рис. 4.

Из таблицы видно, что лучшие результаты имеют сварные соединения медь–никель и медь (луженая) – никель.

Разрыв образцов происходил в местах сварки. Предел прочности на разрыв медной шины составлял 340–450 МПа. При сваривании шин медь–никель и медь (луженая) – никель показатели предела прочности достигли 70 % от прочности исходной медной шины.

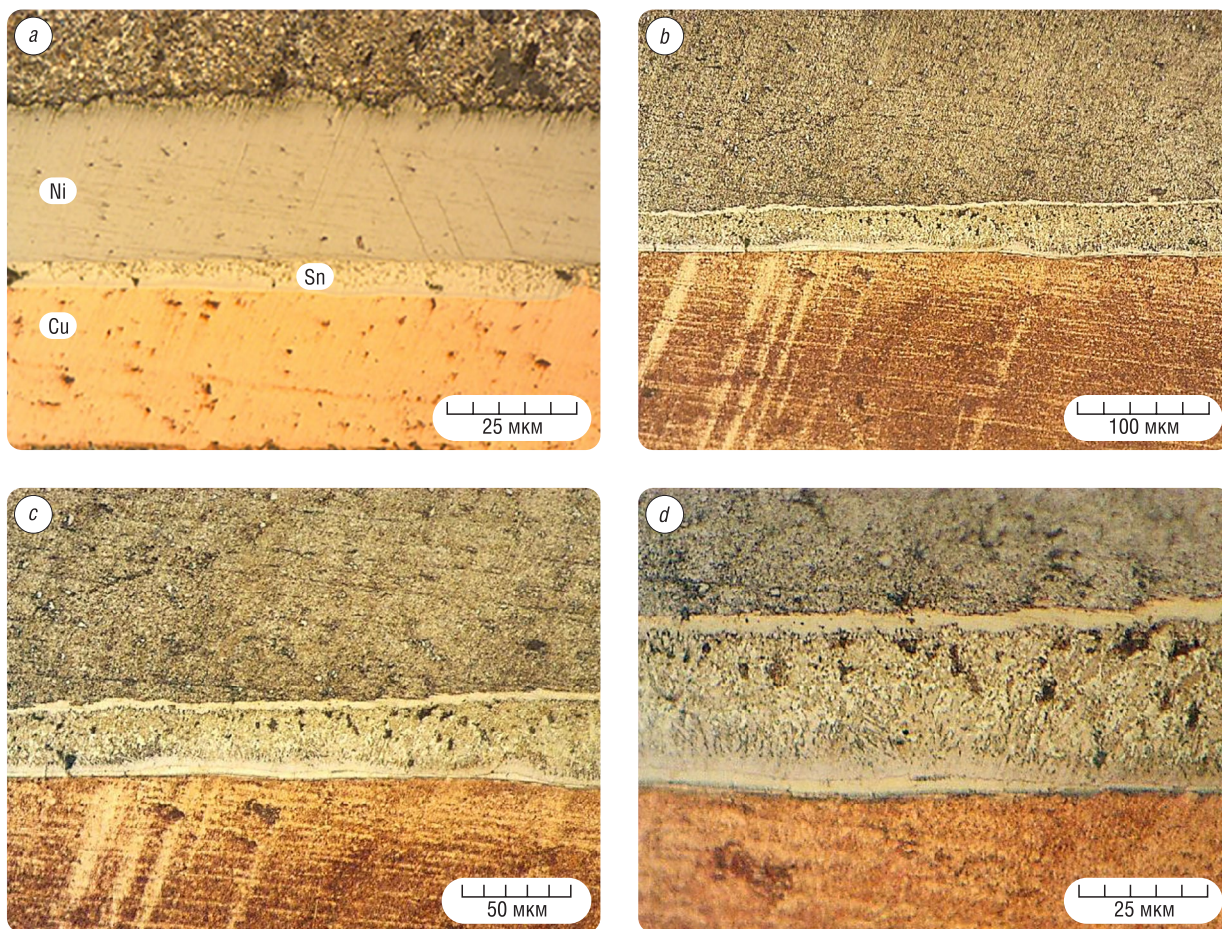


Рис. 3. Микроструктура зоны сварки луженой медной и никелевой шин: *a* – без травления шлифа; *b–d* – при различных увеличениях с травлением шлифа

Fig. 3. Microstructure of the welding zone of tinned copper and nickel tires: *a* – without etching of the cut; *b–d* – at various magnifications with etching of the cut

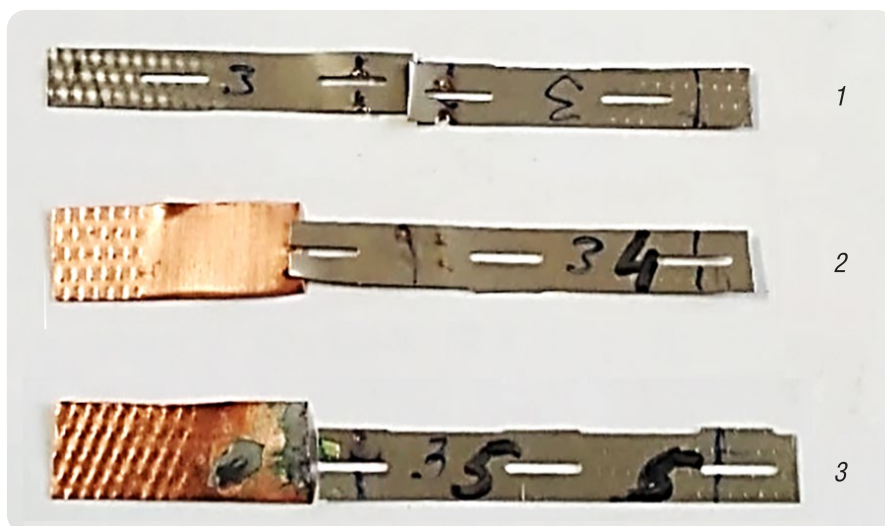


Рис. 4. Образцы после испытания на разрывной машине: *1* – шины никель–никель сечением $0,1 \times 6,9$ мм; *2* – шины медь–никель сечением $0,2 \times 10,6$ и $0,1 \times 6,9$ мм; *3* – шины медь (луженая) – никель

Fig. 4. Samples after testing on a bursting machine: *1* – nickel–nickel tires with a cross section of 0.1×6.9 mm; *2* – copper–nickel tires with a cross section of 0.2×10.6 and 0.1×6.9 mm; *3* – copper (tinned) – nickel tires

Результаты испытаний прочности сварных соединений на разрыв
Test results for the tensile strength of welded joints

Материал образца	Нагрузка, Н	Предел прочности, МПа
Медная шина сечением 0,2×10,6 мм (справочно)	–	340–450
Никелевая шина сечением 0,1×6,9 мм (справочно)	–	400–700
Соединение шин никель–никель	180	262
Соединение шин медь–никель	220	320
Соединение шин медь (луженая) – никель	227	329

С использованием результатов полученных исследований была изготовлена опытная партия ТБ в количестве 5 штук. Данные образцы успешно прошли испытания сварных соединений соединительных шин с элементами питания по уровню переходных сопротивлений и соответствуют техническим требованиям.

Заключение. Рассмотрены вопросы выбора материалов для соединительных шин тяговых батарей, экспериментально установлены оптимальные параметры их точечной сварки с элементами питания.

Проведены эксперименты по свариваемости различных материалов, в том числе с нанесенными покрытиями. Лучшие результаты по свариваемости показала шина из луженой меди, которую приваривали к никелевым корпусам элементов питания. Проведены металлографические исследования зоны сварки, а также испытания прочности сварных соединений на разрыв. Установлено, что лучшие результаты имеют сварные соединения шин медь–никель и медь (луженая) – никель.

Разрыв образцов происходил в местах сварки. Предел прочности на разрыв исходных шин меди составил 340–450 МПа. При сваривании шин медь–никель и медь (луженая) – никель показатели предела прочности достигают 70 % от прочности исходной медной шины.

На основании полученных экспериментальных данных изготовлена опытная партия аккумуляторных ТБ, которая успешно прошла испытания на соответствие техническим требованиям по прочности и величине переходных сопротивлений сварных соединений соединительных шин с элементами питания.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ, проект T21ЭТ-019.

Acknowledgments

This work was supported by the BRFFR, project T21ET-019.

Список использованных источников

1. Николаев, А.В. Исторический обзор и перспективы развития аккумуляторных батарей / А.В. Новиков, А.В. Бурмистров // Апробация. – 2016. – №4 (43). – С. 12–22.
2. Future generations of cathode materials: an automotive industry perspective / D. Andre [et al.] // J. Mater. Chem. A. – 2015. – Vol. 3, iss. 13. – P. 6709–6732. <https://doi.org/10.1039/C5TA00361J>
3. Shi, Y. Effective regeneration of LiCoO₂ from spent lithium-ion batteries: A direct approach towards high-performance active particles / Y. Shi, G. Chen, Z. Chen // Green Chem. – 2018. – Vol. 20, iss. 4. – P. 851–862. <https://doi.org/10.1039/C7GC02831H>
4. Никелевая лента для сварки аккумуляторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.metotech.ru/art_nikel_4.htm – Дата доступа: 28.05.2021.
5. Колачев, Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учеб. для вузов / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: МИСИС, 2005. – 432 с.
6. Direct Recycling Technology for Plug-In Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Packs. Report CEC-500-2016-016 [Electronic resource] / California Energy Commission. – Sacramento, California, March, 2015. – Mode of access: <https://www.coursehero.com/file/17965992/Direct-recycling-5/> – Date of access: 22.08.2018.
7. Логинов, Ю.Н. Медь и деформируемые медные сплавы: учеб. пособие / Ю.Н. Логинов. – 2-е изд., стер. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 136 с.
8. Efficient Simulation and Reformulation of Lithium-Ion Battery Models for Enabling Electric Transportation / P. W. C. Northrop [et al.] // J. Electrochem. Society. – 2014. – Vol. 161, №8. – P. E3149–E3157. <https://doi.org/10.1149/2.018408jes>
9. Joint Formation in Multilayered Ultrasonic Welding of Ni-Coated Cu and the Effect of Preheating / Y. Luo [et al.] // J. Manuf. Sci. Eng. – 2018. – Vol. 140, iss. 11. – P. 111003–111012. <https://doi.org/10.1115/1.4040878>

10. Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances / M.J. Brand [et al.] // *J. Energy Storage*. – 2015. – Vol. 1. – P. 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.est.2015.04.001>
11. Three-Dimensional Thermal Modeling of a Lithium-Ion Battery Pack / H. Sun [et al.] // *J. Power Sources*. – 2012. – Vol. 206. – P. 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.081>

References

1. Nikolaev A. V., Burmistrov A. V. Historical overview and development prospects of storage batteries. *Aprobatsiya = Approbation*, 2016, no. 4 (43), pp. 12–22 (in Russian).
2. Andre D., Kim S.-J., Lamp P., Lux S. F., Maglia F., Paschos O., Stiaszny B. Future generations of cathode materials: an automotive industry perspective. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, vol. 3, iss. 13, pp. 6709–6732. <https://doi.org/10.1039/C5TA00361J>
3. Shi Y., Chen G., Chen Z. Effective regeneration of LiCoO₂ from spent lithium-ion batteries: A direct approach towards high-performance active particles. *Green Chemistry*, 2018, vol. 20, iss. 4, pp. 851–862. <https://doi.org/10.1039/C7GC02831H>
4. *Nickel Battery Welding Tape*. Available at: https://www.metotech.ru/art_nikel_4.htm (accessed 28 May 2021) (in Russian).
5. Kolachev B. A., Elagin V. I., Livanov V. A. *Metallurgy and Heat Treatment of Non-Ferrous Metals and Alloys*. Moscow, MISIS Publ., 2005. 432 p. (in Russian).
6. *Direct Recycling Technology for Plug-In Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Packs. Report CEC-500-2016-016*. Available at: <https://www.coursehero.com/file/17965992/Direct-recycling-5/> (accessed 22 August 2018).
7. Loginov Yu. N. *Copper and Wrought Copper Alloys*. Yekaterinburg, GOU VPO UGTU-UI Publ., 2006. 136 p. (in Russian).
8. Northrop P. W. C., Suthar B., Ramadesigan V., Santhanagopalan S., Braatz R. D., Subramanian V. R. Efficient Simulation and Reformulation of Lithium-Ion Battery Models for Enabling Electric Transportation. *Journal of The Electrochemical Society*, 2014, vol. 161, no. 8, pp. E3149–E3157. <https://doi.org/10.1149/2.018408jes>
9. Luo Y., Hu S. J., Kannatey-Asibu E., Chung H., Cai W., Rinker T., Abell J. Joint Formation in Multilayered Ultrasonic Welding of Ni-Coated Cu and the Effect of Preheating. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2018, vol. 140, iss. 11, pp. 111003–111012. <https://doi.org/10.1115/1.4040878>
10. Brand M. J., Schmidt P. A., Zaeh M. F., Jossen A. Welding Techniques for Battery Cells and Resulting Electrical Contact Resistances. *Journal of Energy Storage*, 2015, vol. 1, pp. 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.est.2015.04.001>
11. Sun H., Wang X., Tossan B., Dixon R. Three-Dimensional Thermal Modeling of a Lithium-Ion Battery Pack. *Journal of Power Sources*, 2012, vol. 206, pp. 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.081>

Информация об авторах

Зеленин Виктор Алексеевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vazelenin@mail.ru

Волочко Александр Тихонович – доктор технических наук, профессор, начальник отдела, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: volochkoat@mail.ru

Патоцкий Денис Анатольевич – генеральный директор ОАО «Приборостроительный завод «Оптрон» (ул. Ф. Скорины, 52, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: com@optron.by

Янкевич Степан Николаевич – начальник научно-исследовательского отдела, ОАО «Приборостроительный завод «Оптрон» (ул. Ф. Скорины, 52, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nio@optron.by

Хроль Игорь Николаевич – младший научный сотрудник, ОАО «Приборостроительный завод «Оптрон» (ул. Ф. Скорины, 52, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: igor_aspirant_fmm@mail.ru

Подорожная Ирина Викторовна – младший научный сотрудник, ОАО «Приборостроительный завод «Оптрон» (ул. Ф. Скорины, 52, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: iaya@tut.by

Information about the authors

Victor A. Zelenin – D. Sc. (Engineering), Chief Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vazelenin@mail.ru

Alexander T. Volochko – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volochkoat@mail.ru

Denis A. Patotsky – Director, JSC “Instrument-Making Plant “Optron” (52, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: com@optron.by

Stsiapan N. Yankevich – Head of the Scientific Department, JSC “Instrument-Making Plant “Optron” (52, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nio@optron.by

Igor N. Khrol – Junior Researcher, JSC “Instrument-Making Plant “Optron” (52, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: igor_aspirant_fmm@mail.ru

Irina V. Podorozhniaya – Junior Researcher, JSC “Instrument-Making Plant “Optron” (52, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: iaya@tut.by