

## ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ

К.А. РЯБКО<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Е.М. АРЕФЬЕВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Ростовский государственный университет путей сообщения (филиал в г. Воронеже)  
394026, Воронеж, ул. Урицкого, 75а; e-mail: railroader@yandex.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)

190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 24-26/49 литера А; e-mail: elcross@mail.ru

© Рябко К.А., Арефьев Е.М., 2023

Представлена методика оценки прочностных характеристик аккумуляторных батарей шахтных электровозов, позволяющая определить расчетные напряжения в боковых вертикальных и горизонтальных поверхностях корпуса аккумулятора, выполненного из ударопрочных термопластов, при воздействии горизонтальных или вертикальных ударных нагрузок. Установлено, что напряжения, возникающие в боковых стенках корпуса аккумулятора с толщиной менее 12,5 мм, при критических горизонтальных ударных воздействиях превышают допускаемые значения напряжения на изгиб. Толщина стенок аккумуляторной батареи шахтного электровоза, выполненных из блок-сополимера пропилена с этиленом, должна составлять не менее 18 мм, в данном случае коэффициент запаса прочности будет составлять 1,5. Соотношение размеров сторон корпуса аккумулятора оказывает непосредственное влияние на напряжения в стенках при критических горизонтальных ударных нагрузках.

*Ключевые слова:* шахтный электровоз, аккумуляторная батарея, механические воздействия, ударопрочность, схема нагружения, расчетные напряжения, полипропилен ударопрочный.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-31-43**

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в качестве тяговых единиц вспомогательного транспорта горных предприятий все более широкое применение находят напочвенные и подвесные монорельсовые локомотивы на аккумуляторной тяге. Безопасность их эксплуатации в значительной степени зависит от качества оценки и обоснования прочностных характеристик аккумуляторных батарей.

Современные электрохимические системы шахтных напочвенных и подвесных монорельсовых локомотивов в процессе эксплуатации непрерывно подвергаются знакопеременным механическим воздействиям. Механические воздействия на аккумулятор обусловлены весом самой электрохимической системы, ее габаритами, режимами работы локомотива, профилем пути и скоростями движения. Величину и характер нагрузок на аккумуляторную батарею целесообразно определять перед вводом в эксплуатацию той или иной электрохимической системы.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В наши дни в качестве тяговых аккумуляторных батарей шахтных электровозов находят широкое применение как жидкостные, так и безжидкостные герметичные электрохимические системы: кислотные аккумуляторные батареи с жидким или

гелевым электролитом, щелочные, литий-ионные, фторид-ионные, полимерные и другие аккумуляторные батареи [1, 2]. Общим условием для применения всех типов аккумуляторных батарей является их ударопрочность, так как от целостности корпуса аккумулятора зависит его пожаровзрывобезопасность [3–5]. Особый интерес у ученых вызывает самонагрев активной массы литий-ионных аккумуляторов, который может развиться в тепловой разгон, приводящий к быстрому повышению давления и температуры в ячейке с последующим воспламенением батареи [6]. Как известно, тепловой разгон литий-ионных аккумуляторов при эксплуатации возникает в первую очередь из-за механических повреждений или коротких замыканий элементов [7, 8]. Тепловой разгон литий-ионного аккумулятора шахтных электровозов является серьезной проблемой, поскольку воспламенение аккумуляторов может вызвать взрыв и пожар в горной выработке.

Как показал анализ публикаций, модели оценки прочностных характеристик аккумуляторных батарей шахтных электровозов либо отсутствуют, либо дают косвенное представление о прочностных параметрах корпуса аккумулятора [9, 10]. Применяемые методы построения имитационных моделей оценки прочностных характеристик как конструкций шахтных монорельсовых локомотивов, так и их аккумуляторных батарей требуют значительных затрат времени, вычислительных мощностей и труда высококвалифицированных разработчиков электрохимических систем и программистов. В связи с этим выполненные разработки и НИОКР при проектировании шахтных электровозов на аккумуляторной тяге, как правило, недоступны широкому кругу ученых и в большинстве случаев используются для решения инженерного круга задач в рамках конкретной разработки. Поэтому оценка прочностных характеристик аккумуляторных батарей шахтных электровозов является весьма актуальной задачей.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Шахтные аккумуляторные локомотивы в исполнении РП (рудничные повышенной надежности) применяются:

в откаточных выработках шахт I и II категорий по газу или опасных по пыли;

откаточных выработках со свежей струей воздуха шахт III категории и сверхкатегорийных по газу;

откаточных выработках со свежей струей воздуха на неопасных по внезапным выбросам пластах и опасных по внезапным выбросам шахтах.

Шахтные аккумуляторные локомотивы в исполнении РВ (рудничные взрывобезопасные) эксплуатируются:

в откаточных выработках шахт, опасных по газу или пыли;

выработках шахт с исходящей струей воздуха и тупиковых, проветриваемых вентиляторами местного проветривания;

на шахтах III категории, сверхкатегорийных по газу и опасных по внезапным выбросам.

Все электрооборудование аккумуляторных электровозов, кроме аккумуляторных батарей, имеет взрывозащищенное исполнение, что определяется сборником документов «Безопасность горнотранспортного оборудования, электроустановок и электрооборудования угольных шахт и разрезов» [11], и должно соответствовать указанным в этих документах требованиям.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод об актуальности исследований, направленных на оценку прочностных характеристик аккумуляторных батарей шахтных электровозов.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполним оценку требований по прочности, предъявляемых к аккумуляторным батареям для шахтных аккумуляторных локомотивов в исполнении РП и РВ:

1) конструкция батарейных ящиков и аккумуляторных батарей должна выдерживать испытания, а также отвечать требованиям действующей нормативно-технической документации;

2) в некоторых случаях допускается в отсеках батарейных ящиков напряжение свыше 40 В, если приняты дополнительные меры по обеспечению высокого сопротивления изоляции аккумуляторных батарей относительно корпуса ящика;

3) батарейные ящики должны изготавливаться с учетом возможности снятия их с локомотива;

4) сборка элементов в батарею должна выполняться с помощью гибких изолированных перемычек, которые не должны испытывать внешние механические нагрузки.

В требованиях, предъявляемых к аккумуляторным батареям автономных шахтных электровозов в исполнении РП и РВ, не оговариваются требования по прочности самих аккумуляторных батарей, а требования к ящикам весьма поверхностные и не регламентируют количественных параметров ударопрочности аккумуляторного ящика и самого аккумулятора [11].

Вне зависимости от схемы компоновки или электрохимической системы механические нагрузки, воздействующие на аккумуляторный ящик, передаются на элементы аккумуляторной батареи [12].

В процессе эксплуатации шахтных электровозов возникают статические и динамические механические воздействия. К статическим нагрузкам можно отнести вес аккумуляторной батареи и усилия, возникающие в местах ее крепления к батарейному отсеку. Динамические усилия возникают преимущественно в процессе движения или аварийной ситуации, к ним можно отнести силы инерции, вибрации и ударные поперечные или продольные усилия. С точки зрения взрывобезопасности и надежности работы источников питания шахтных подвесных монорельсовых и напочвенных аккумуляторных локомотивов наибольшее влияние оказывают ударные механические воздействия.

Так как воздействия ударных усилий на аккумуляторный ящик имеют случайный характер, методика оценки прочностных характеристик аккумуляторных батарей шахтных электровозов не может быть типовой. Разработка сложных аналитических зависимостей определения ударных динамических нагрузок на аккумулятор шахтного электровоза нецелесообразна, поскольку условия эксплуатации, а также возможность возникновения аварийных ситуаций оказывают существенное влияние на исходные данные. Оценка прочностных характеристик аккумуляторных батарей шахтных электровозов целесообразно проводить с помощью приближенной методики, которая будет учитывать только влияние ударных нагрузок на электрохимическую систему и корпус аккумуляторного элемента.

Выполним оценку ударопрочности корпуса аккумулятора, изготовленного из полимерной композиции. Принимаем, что корпус аккумулятора – это пространственный полый прямоугольный параллелепипед. При данной конструкции корпуса аккумуляторного элемента можно использовать методику приближенного расчета. Отношение длины боковых продольных стенок к торцевым поперечным в большинстве конструкций тяговых аккумуляторов шахтных локомотивов составляет 2:1, что позволяет применить методику расчета цилиндрического изгиба стенки. В данном случае расчет прочности при горизонтальном ударе сводится к оценке действия

горизонтальных усилий на замкнутую рамку, которая образована двумя горизонтальными секущими плоскостями.

При горизонтальных ударных нагрузках, направленных вдоль оси аккумулятора, передача усилия на корпус будет происходить по продольным стенкам. Составим расчетную схему нагружения замкнутой рамки (рис. 1).

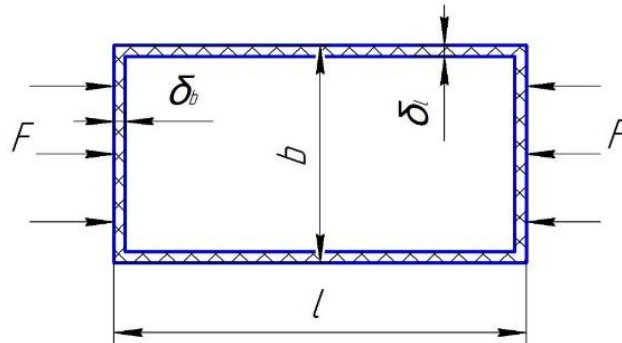


Рис. 1. Расчетная схема нагружения замкнутой рамки корпуса аккумулятора шахтного локомотива при воздействии горизонтальных ударных воздействий

Рассмотрим боковую поверхность корпуса аккумулятора. Для этого выделим из расчетной схемы боковую стенку прямоугольника с размером  $l$ . Данный элемент расчетной схемы расположен параллельно действию ударных нагрузок  $F$ , выбранный расчетный элемент представим в виде балки.

Тогда расчетное напряжение по центру данной балки с длиной  $l$  и толщиной  $\delta_l$  можно записать в виде

$$\sigma_1 = \frac{6 \cdot F \cdot h}{\delta_l^2 \cdot (1 + K)} \cdot \frac{1}{\cos\left(\frac{l}{2} \sqrt{\frac{12F}{E\delta_l^3}}\right)},$$

где  $F = \frac{K_{\text{дин}} Q_{\text{АБ}} n}{2H + 2b}$  – интенсивность горизонтальных ударных нагрузок по высоте стенки

корпуса ( $K_{\text{дин}}$  – коэффициент динамичности;  $Q_{\text{АБ}}$  – вес аккумуляторного элемента или батареи;  $n$  – коэффициент перегрузки;  $H$  – высота корпуса аккумулятора);

$h$  – плечо горизонтальных ударных нагрузок;

$\delta_l$  – толщина продольной стенки корпуса аккумулятора;

$K$  – коэффициент, учитывающий геометрические параметры корпуса аккумулятора,  $K = \frac{l\delta_b^3}{b\delta_l^3}$  ( $\delta_b$  – толщина поперечной стенки корпуса аккумулятора);

$E$  – модуль упругости.

Прогиб балки с длиной  $l$  и толщиной  $\delta_l$  по ее поперечной оси можно записать в виде

$$f_l = \frac{3F \cdot h \cdot l^2}{4E \cdot \delta_l^3 (1 + K)} \varphi_0(u),$$

где  $\varphi_0(u)$  – функции изгиба.

Определим расчетное напряжение поперечной балки, расположенной перпендикулярно действию ударных нагрузок  $F$ , т. е. фактически данная сторона корпуса аккумулятора воспринимает динамические ударные нагрузки, при этом напряжения по центру балки и в месте сопряжения с продольной балкой будут различны.

По центру балки

$$\sigma_2 = \frac{6F \cdot h \cdot K}{\delta_b^2(1+K)}.$$

В месте сопряжения с продольной балкой

$$\sigma_{\text{сопр}} = \frac{6F \cdot h}{\delta_b^2(1+K)}.$$

Прогиб поперечной балки с длиной  $b$  может быть представлен выражением

$$f_b = \frac{3}{2} \cdot \frac{F \cdot b^2}{E\delta_2^3} \cdot \frac{K}{1+K}.$$

При этом критические нагрузки на вертикальные стенки корпуса аккумулятора могут быть записаны в следующем виде:

$$F_{\text{кр}l} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \delta_l^2}{12l^2}; F_{\text{кр}b} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \delta_b^2}{12b^2}.$$

Горизонтальные ударные воздействия на аккумуляторные батареи шахтных автономных электровозов возникают достаточно часто: при трогании с места или торможении, сцепках тяговой единицы с составом или аварийных ситуациях.

При штатных режимах работы шахтных монорельсовых подвесных или напочвенных локомотивов критические вертикальные ударные нагрузки возникают достаточно редко, так как батарейный отсек практически не испытывает ударов в вертикальной плоскости, однако нагрузки, которые могут возникнуть при аварийных ситуациях, представляют наибольшую опасность для целостности корпуса батареи. Такие нагрузки могут появиться при падении тяжелых предметов на аккумуляторный отсек или падении самого аккумуляторного отсека при сходе состава с рельсов.

Рассмотрим воздействие вертикальных ударных нагрузок на горизонтальные плоскости корпуса аккумулятора. Днище и боковые стенки корпуса аккумулятора при вертикальном ударе будут испытывать распределенную ударную нагрузку от электролита и пластин с активной массой в случае жидкостной электрохимической системы и распределенную ударную нагрузку от активной массы с электродами при применении герметичных литий-ионных аккумуляторов. При этом наиболее подвержены повреждению области, расположенные в средней части боковых поверхностей корпуса аккумулятора шахтного электровоза.

Составим расчетную схему распределения нагрузок при вертикальном динамическом воздействии (рис. 2).

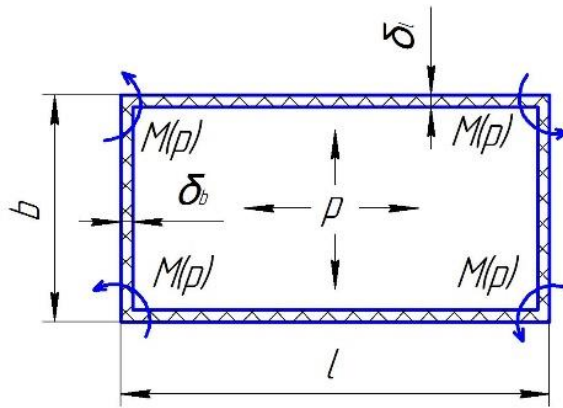


Рис. 2. Расчетная схема распределения нагрузок при вертикальном динамическом воздействии

Изгибающий момент от действия распределенной нагрузки  $p$  при вертикальном динамическом воздействии в сопрягаемых узлах боковых стенок корпуса аккумулятора может быть записан в виде

$$M_F = \frac{pb^2}{12} \cdot \frac{1 + K \cdot l^2 / b^2}{1 + K},$$

где  $p$  – равномерно распределенная нагрузка динамического воздействия по длине стенки аккумулятора.

Запишем изгибающие моменты, воздействующие на боковые и торцевые стенки корпуса аккумулятора при вертикальных динамических воздействиях:

$$M_{изгл} = \frac{pb^2}{12(1+K)} \left[ \frac{l^2}{b^2} (1,5 + 0,5K) - 1 \right];$$

$$M_{изгб} = \frac{pb^2}{12(1+K)} \left[ 0,5 + K \left( 1,5 - \frac{l^2}{b^2} \right) \right].$$

Осевые усилия в боковых стенках, которые возникают при ударных нагрузках на корпус аккумулятора, можно записать в виде

$$P_{ol} = \frac{pl}{2}; \quad P_{ob} = \frac{pb}{2}.$$

Соответственно, напряжения в боковых стенках корпуса аккумулятора:

$$\sigma_l = \frac{P_{ob}}{\delta_l^2} + \frac{6M_{изгл}}{\delta_l^3}; \quad \sigma_b = \frac{P_{ol}}{\delta_b^2} + \frac{6M_{изгб}}{\delta_b^3}.$$

Выполним оценку прочностных характеристик корпусов аккумуляторных батарей шахтных электровозов, выполненных из различных термопластов. Наиболее распространенными материалами для изготовления корпуса как жидкостных, гелевых, так и литий-ионных аккумуляторных батарей являются ударопрочный полипропилен (смесь гомополипропилена и этилен-пропиленового каучука или другого эластомера) и блок-сополимер пропилена с этиленом.

Ударопрочный полипропилен обладает следующими свойствами: химической стойкостью, морозостойкостью, стойкостью к ударным нагрузкам, повышенной

эластичностью и устойчивостью к знакопеременным нагрузкам. Область применения ударопрочного полипропилена достаточно обширна: изготовление элементов узлов и агрегатов машин и механизмов, некоторых конструктивных элементов автомобилей и специального транспорта, элементов конструкций летательных аппаратов; в качестве конструкционного материала в электротехнике, приборостроении и др. [13].

Блок-сополимер пропилена с этиленом представляет собой модифицированный полимер пропилена с внесенным в его молекулярную цепочку в процессе синтеза этиленом. В результате такой модификации полимер приобретает улучшенные дополнительные свойства [14].

Основные свойства блок-сополимера пропилена с этиленом: огнестойкость; повышенная прочность при ударных нагрузках; устойчивость к знакопеременным механическим воздействиям; высокая стабильность и эластичность; улучшенные прочностные характеристики как на сжатие, излом, так и на растяжение; достаточно высокая устойчивость к длительному температурному влиянию (постоянная температура рабочей среды до 140 °С); высокая устойчивость к воздействию агрессивных химических веществ (электролитов); повышенные электроизоляционные качества; долговечность. Данный полимер в меньшей степени подвержен механическому износу при знакопеременных нагрузках по сравнению с обычным полипропиленом [14].

Результаты анализа свойств ударопрочного полипропилена и блок-сополимера пропилена с этиленом обуславливают целесообразность применения последнего в качестве конструкционного материала аккумуляторных батарей шахтного подземного транспорта. Основные технические характеристики полимеров, учитываемые при оценке прочностных характеристик аккумуляторных батарей шахтных электровозов, приведены в таблице.

Основные технические характеристики полимеров  
для корпусов аккумуляторных батарей

Параметр	Материал	
	Полипропилен ударопрочный	Блок-сополимер пропилена с этиленом
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,94...0,97	0,90...0,92
Модуль упругости при изгибе, МПа, не менее	1 190	1 100
Допускаемое напряжение при изгибе, МПа	34,8	36

По приведенным зависимостям  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  для боковых поверхностей корпуса аккумулятора получены значения расчетных напряжений для данных элементов расчетной схемы (см. рис. 1), выполненных из ударопрочного полипропилена (рис. 3а) и блок-сополимера пропилена с этиленом (рис. 3б), при воздействии горизонтальных ударных нагрузок. На рис. 3, 4, 6 цифрами обозначено: 1 – напряжения в продольной стенке аккумулятора, на расчетной схеме элемент с длиной  $l$ ; 2 – напряжения в торцевой стенке аккумулятора, на расчетной схеме элемент с длиной  $b$ ; 3 – допускаемое значение напряжения на изгиб.

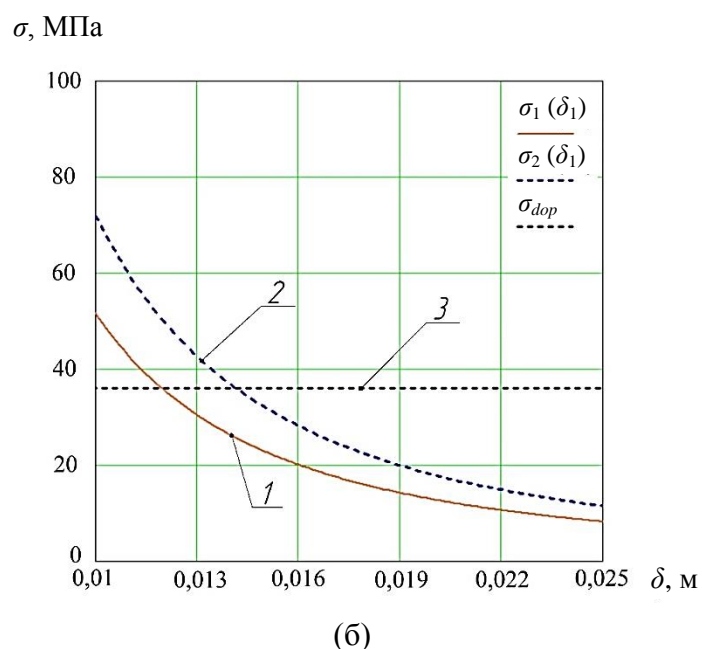
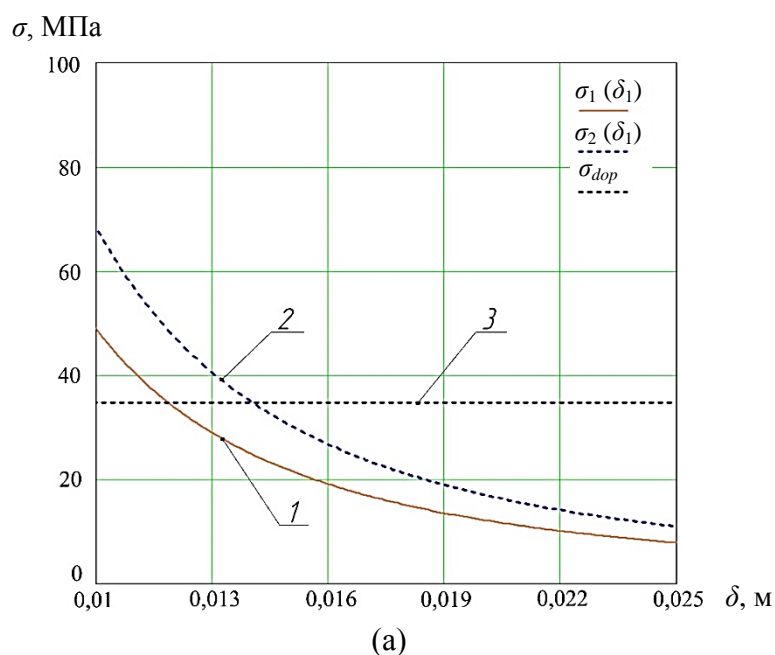


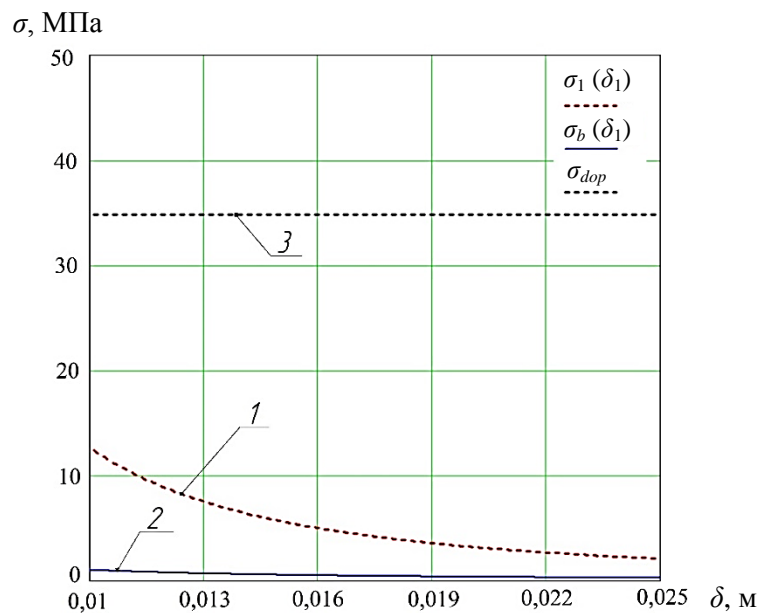
Рис. 3. Расчетные напряжения в боковых поверхностях корпуса аккумулятора шахтного электровоза, выполненного из ударпрочного полипропилена (а) и блок-сополимера пропилена с этиленом (б), при воздействии горизонтальных ударных нагрузок

По приведенным зависимостям  $\sigma_l$  и  $\sigma_b$  для боковых поверхностей корпуса аккумулятора получены значения расчетных напряжений для данных элементов расчетной схемы (см. рис. 2), выполненных из ударпрочного полипропилена (рис. 4а) и блок-сополимера пропилена с этиленом (рис. 4б), при вертикальном динамическом воздействии.

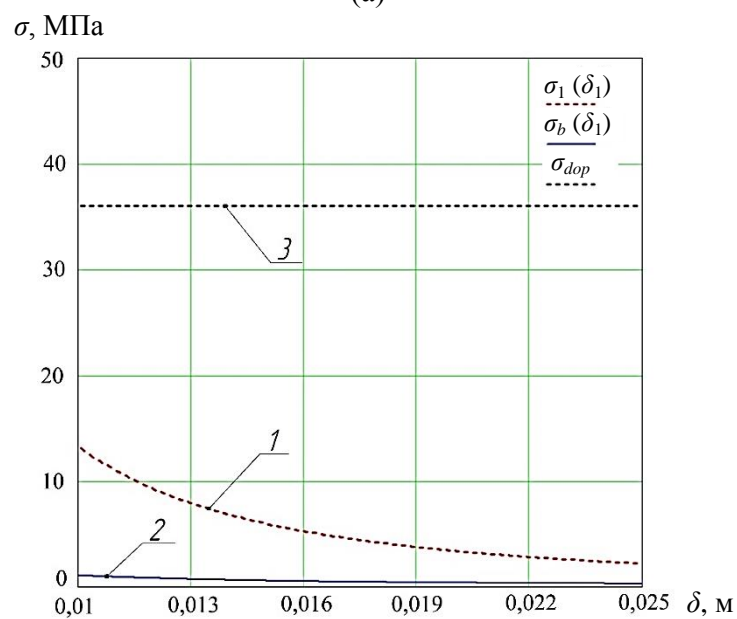
На основании полученных зависимостей можно сделать вывод, что корпус аккумуляторной батареи шахтного электровоза, выполненный из блок-сополимера пропилена с этиленом, имеет лучшие эксплуатационные и прочностные характеристики. Продольные или поперечные ударные нагрузки оказывают непосредственное



воздействие на боковые стенки корпуса и определяют его ударпрочность. Это является решающим фактором при выборе толщины стенки корпуса аккумулятора шахтного электровоза для обеспечения его взрывобезопасности и соблюдения требований надежности при критических нагрузках.



(а)



(б)

Рис. 4. Расчетные напряжения в боковых поверхностях корпуса аккумулятора шахтного электровоза, выполненного из ударпрочного полипропилена (а) и блок-сополимера пропилена с этиленом (б), при вертикальном динамическом воздействии

Напряжения, возникающие в боковых стенках корпуса аккумулятора, при горизонтальных ударных воздействиях при толщине стенок менее 12,5 мм превышают допускаемые значения напряжения на изгиб, что приводит к необходимости

предъявлять особые требования к монтажу батареи в аккумуляторном ящике и обеспечивать ее надежное крепление в силовом каркасе.

Ударные нагрузки, воздействующие сверху на корпус батареи, определяющего влияния на толщину стенок не оказывают. Напряжения, возникающие в продольной и торцевой стенках аккумулятора, при вертикальных ударных воздействиях на горизонтальные поверхности корпуса значительно ниже допускаемых значений напряжения на изгиб.

Ударопрочность будет считаться удовлетворительной при коэффициенте запаса прочности не менее 1,5, соответственно, при минимальных требованиях к силовому каркасу толщина стенок, выполненных из блок-сополимера пропилена с этиленом или ударопрочного полипропилена, должна составлять не менее 18 мм.

Можно предположить, что соотношение размеров сторон корпуса аккумулятора шахтного электровоза оказывает существенное влияние на его ударопрочность. Для проверки данной гипотезы была выполнена оценка влияния соотношения размеров сторон на напряжения в стенках, выполненных из блок-сополимера пропилена с этиленом, при фиксированном значении  $\delta_{ij} = 12,5$  мм и критических горизонтальных ударных нагрузках (рис. 5).

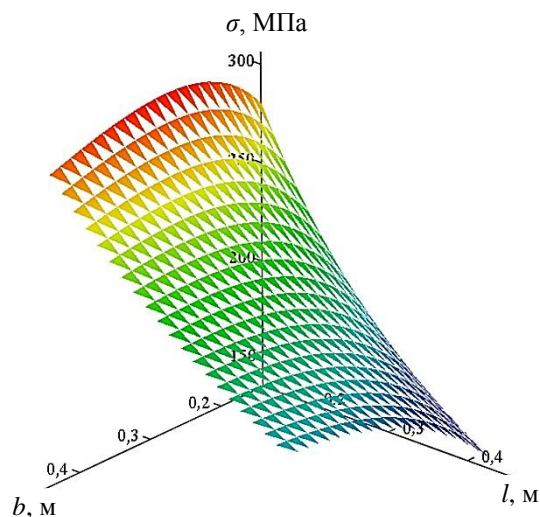


Рис. 5. Расчетные напряжения в боковых поверхностях корпуса аккумулятора шахтного электровоза, выполненного из блок-сополимера пропилена, в зависимости от соотношения боковых сторон корпуса

Направлением снижения ударных нагрузок в стенках корпуса аккумуляторных батарей шахтных электровозов может быть применение силового демпфирующего каркаса между батареями. В данном случае демпфирующий каркас воспринимает и равномерно распределяет ударные нагрузки, вследствие этого толщину стенок корпуса аккумуляторной батареи можно снизить. Для подтверждения актуальности применения демпфирующего каркаса выполнен расчет напряжений в боковых стенках корпуса аккумуляторной батареи в зависимости от величины ударных нагрузок при фиксированном значении  $\delta_{ij} = 12,5$  мм (рис. 6). Оценка расчетных напряжений в боковых стенках корпуса аккумуляторной батареи в зависимости от величины ударных нагрузок выполнена для веса аккумуляторной батареи 20 кН. При этом следует отметить, что применение демпфирующего каркаса различных конструкций позволит снизить активный вес, участвующий в ударных нагрузках, до 1 кН.

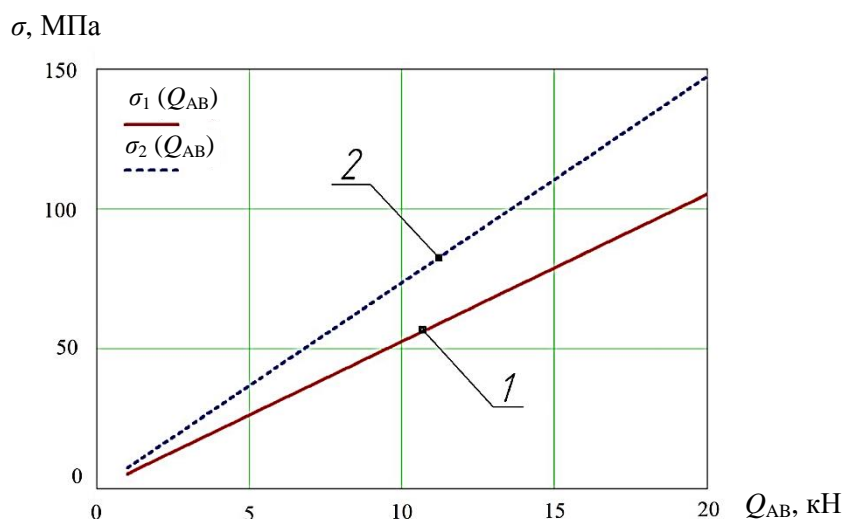


Рис. 6. Расчетные напряжения в боковых стенках корпуса аккумуляторной батареи в зависимости от величины ударных нагрузок

На основании полученных зависимостей расчетных напряжений в боковых стенках корпуса аккумуляторной батареи и с учетом величины ударных нагрузок можно сделать вывод о целесообразности применения демпфирующего каркаса аккумуляторного отсека с целью снижения значений напряжений. Однако данный вопрос требует конкретизации и уточнений, поэтому будет рассмотрен дополнительно в дальнейших исследованиях с учетом конструктивных особенностей корпуса батарей и различных электрохимических систем.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценку прочностных характеристик аккумуляторных батарей шахтных электровозов целесообразно проводить с помощью приближенной методики, которая будет учитывать только влияние ударных нагрузок на электрохимическую систему и корпус аккумуляторного элемента.

Рассмотрены воздействия вертикальных ударных нагрузок на вертикальные и горизонтальные плоскости корпуса аккумулятора. Днище и боковые стенки корпуса аккумулятора при вертикальном ударе испытывают распределенную ударную нагрузку от электролита и пластин с активной массой в случае жидкостной электрохимической системы и распределенную ударную нагрузку от активной массы с электродами при применении герметичных гелевых или литий-ионных аккумуляторов. При этом наиболее подверженными повреждению являются области, расположенные в средней части боковых поверхностей стенок корпуса аккумулятора шахтного электровоза.

На основании анализа свойств современных конструкционных материалов корпусов аккумуляторных батарей можно сделать вывод о целесообразности применения блок-сополимера пропилена с этиленом в качестве конструкционного материала корпусов аккумуляторных элементов шахтного подземного транспорта. Установлено, что корпус аккумуляторной батареи шахтных электровозов, выполненный из блок-сополимера пропилена с этиленом, имеет лучшие эксплуатационные и прочностные характеристики. Продольные или поперечные ударные нагрузки оказывают непосредственное воздействие на боковые стенки корпуса и определяют их ударопрочность, что является решающим фактором при выборе толщины стенок корпуса аккумулятора шахтного электровоза с целью обеспечения его взрывобезопасности и соблюдения требований надежности при критических нагрузках.

Выполненные расчеты свидетельствуют, что минимально допустимая толщина боковых стенок корпуса аккумулятора, выполненного из блок-сополимера пропилена с этиленом или ударопрочного полипропилена, при горизонтальных нагрузках должна составлять не менее 12,5 мм. При этом напряжения на изгиб не превышают допустимых значений. При вертикальных ударных воздействиях напряжения в продольной и торцевой стенках аккумулятора не превышают допустимых значений.

Установлено, что при минимальных требованиях к силовому каркасу толщина стенок аккумуляторной батареи шахтного электровоза, выполненных из блок-сополимера пропилена с этиленом или ударопрочного полипропилена, должна составлять не менее 18 мм. В данном случае ударопрочность будет считаться удовлетворительной и коэффициент запаса прочности корпуса аккумуляторного элемента будет составлять 1,5. Соотношение размеров сторон корпуса боковых стенок определяет величину напряжения в стенках. Для снижения ударных нагрузок в стенках корпуса аккумуляторных батарей шахтных электровозов может устанавливаться силовой демпфирующий каркас между батареями, который позволит снизить напряжения, возникающие вследствие ударных нагрузок, а также уменьшить толщину корпуса аккумуляторного элемента.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Обзор конструкций тяговых аккумуляторных батарей, применяемых на шахтных электровозах / В.О. Гутаревич [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2020. № 2. С. 109–118.
2. Рябко К.А. Исследование процесса заряда аккумуляторных батарей шахтных подвесных монорельсовых локомотивов // *Горная механика и машиностроение*. 2022. № 2. С. 30–36.
3. Ryabko K.A. Explosion protection of batteries for mining suspended monorail locomotives // *Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции*. Кемерово: КузГТУ. 2021. С. 126.
4. ГОСТ Р 52083-2003. Аккумуляторы никель-железные открытые призматические. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов. 2003. 20 с.
5. ГОСТ Р МЭК 62485-1-2020. Батареи аккумуляторные и аккумуляторные установки. Требования безопасности. Часть 1. Общие требования безопасности. М.: Стандартинформ. 2020. 16 с.
6. Язвинская Н.Н. Исследование теплового разгона в литий-ионных аккумуляторах // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2020. № 2 (206). С. 89–95.
7. A review of lithium-ion battery thermal runaway modeling and diagnosis approaches / M.K. Tran [et al.] // *Processes*. 2022. V. 10. № 6. P. 1192.
8. Multi-field Interpretation of Internal Short Circuit and Thermal Runaway Behavior for Lithium-ion Batteries under Mechanical Abuse / H. Li [et al.] // *Energy*. 2023. V. 263. P. 126027.
9. Szlązak N., Korzec M., Cheng J. Using Battery-Powered Suspended Monorails in Underground Hard Coal Mines to Improve Working Conditions in the Roadway // *Energies*. 2022. V. 15. № 20. P. 7527.
10. An Innovative CA-190 Monorail Battery Locomotive Powered by a VOLTER Lithium Battery / T. Budniok [et al.] // *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering*. 2021. V. 59. P. 63–68.

11. Безопасность горнотранспортного оборудования, электроустановок и электрооборудования угольных шахт и разрезов: сборник документов / отв. сост.-разраб. А.И. Субботин. М.: Пром. безопасность. 2008. 158 с.

12. Малахова В.В., Малахов О.В. К вопросу выбора узлов автомобиля, подлежащих модернизации, с учетом критерия повышения надежности автомобиля // *Вестник Луганского национального университета им. В. Даля*. 2019. № 6 (24). С. 171–175.

13. Рыжикова И.Г., Волков А.М., Бауман Н.А., Казаков Ю.М., Вольфсон С.И. Исследование физико-механических свойств смесей ПП/СКЭПТ, модифицированных пероксидом и системой пероксид/ТМПА // *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. Т. 16. № 10. С. 134–137.

14. Реутов А.И. Надежность изделий из полимерных композиционных материалов с учетом статистической изменчивости их характеристик // *Известия Томского политехнического университета*. 2010. Т. 317. № 2. С. 58–62.

**Для цитирования:** Рябко К.А., Арефьев Е.М. Оценка прочностных характеристик аккумуляторных батарей шахтных электровозов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 2 (18). С. 31–43.

## EVALUATION OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF BATTERIES OF MINE ELECTRIC LOCOMOTIVES

К.А. RYABKO<sup>1</sup>, Cand. Sc., Е.М. AREFYEV<sup>2</sup>, Cand. Sc.

<sup>1</sup> Rostov State Transport University (branch in Voronezh)

75a, st. Uritsky, Voronezh, 394026, Russian Federation; e-mail: railroader@yandex.ru

<sup>2</sup> St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)

24-26/49 letter A, Moskovsky prospect, St. Petersburg, 190013, Russian Federation;  
e-mail: elcross@mail.ru

The method for assessing the strength characteristics of batteries of mine electric locomotives presented in the article makes it possible to determine the calculated stresses in the lateral vertical and horizontal surfaces of the battery case made of impact-resistant thermoplastics under the influence of horizontal or vertical shock loads. It has been established that the stresses arising in the side walls of the battery case with a thickness of less than 12.5 mm, under critical horizontal impacts, exceed the allowable values of the bending stress. The thickness of the walls of the storage battery of a mine electric locomotive, made of a block copolymer of propylene with ethylene, must be at least 18 mm, in this case, the safety factor will be 1.5. The aspect ratio of the battery case has a direct effect on the stresses in the walls under critical horizontal shock loads.

*Keywords:* mining electric locomotive, storage battery, mechanical effects, impact resistance, loading scheme, design stresses, shock-resistant polypropylene.

Поступила в редакцию/received: 16.12.2022; после рецензирования/revised: 18.12.2022;  
принята/accepted: 25.12.2022