

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕШЕТКИ ТОКОВОДА АККУМУЛЯТОРОВ-ЭНЕРГОАКОПИТЕЛЕЙ И ИХ РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ

Анотация. Механические характеристики решеток определены на основе экспериментальных данных. Эксперименты проведены для отдельной полосы и для решетки в целом. Отмечена зависимость механических характеристик решетки от технологического процесса их изготовления. Предложена расчетная схема решетки в виде пластины, которая имеет специфические механические характеристики.

Ключевые слова: решетка, коэффициент жесткости, модуль упругости, расчетная схема.

Введение

В (1) разработана инженерная методика определения наряду деформированного состояния и устойчивости первоначальной формы решеток тоководов аккумуляторов-энергонакопителей.

Расчетной схемой решетки была дискретная модель, представленная в виде отдельных жилок, не взаимодействующих между собой. Проведена оценка потери первоначальной формы решетки на основе предложенной расчетной схемы. Установлено, что жилки решетки под действием расчетной нагрузки не теряют свою первоначальную форму.

Одним из возможных факторов, влияющих на потерю устойчивости первоначальной формы решетки, являлось наличие начальных несовершенств в жилках решетки. Они могут появиться в процессе изготовления решеток при нарушении некоторых технологических операций.

Если исключить нарушения технологического процесса при изготовлении решеток, то актуальными вопросами являются точность определения механических характеристик материала решеток.

К основным механическим характеристикам материала относятся: модуль упругости E (модуль Юнга, модуль упругости первого рода), предел упругости σ_y или предел пропорциональности $\sigma_{0.2}$, временное сопротивление на разрыв σ_s , коэффициент Пуассона μ .

Модуль упругости применяется практически во всех теоретических расчетах: при определении напряженно-деформированного состояния (НДС), в задачах устойчивости, при расчетах собственных значений частот и амплитуд колебаний.

Величины предела упругости σ_y определяют область применения получаемых результатов. В частности, если в результате расчетов получены

величины напряжений, превышающие σ_y , то необходимо проведение дополнительных исследований.

Значения временного сопротивления σ_s служат для определения запаса прочности.

Коэффициент Пуассона целесообразно использовать, когда геометрия конструкции определяется не одним размером (например, стержень), а двумя (пластина) и более размерами. Его еще называют коэффициентом поперечной деформации. Коэффициент Пуассона отражает долю деформации, которая происходит в направлении, перпендикулярном направлению действия внешней нагрузки.

В некоторых теоретических исследованиях применяются значения модуля сдвига или модуля упругости второго рода G . Для многих материалов его значение определяется через модуль упругости E и коэффициент Пуассона μ . Для вновь создаваемых материалов или сплавов желательнее экспериментальное определение величин модуля сдвига.

Современные конструкции решеток токоотводов имеют сложную конфигурацию, что делает затруднительным их анализ напряженно-деформированного состояния по имеющимся в литературе методикам.

Целью настоящей работы являлось определение основных механических характеристик материала решеток токоотвода.

Механические характеристики определялись на основе ранее проведенных экспериментальных исследований.

Задачи исследований:

- анализ экспериментальных данных
- разработка методик определения механических характеристик материала решеток на основе экспериментальных данных
- определение механических характеристик материала решетки при ее рассмотрении как двумерной континуальной (непрерывной) модели (расчетная схема-пластина).

Определение механических характеристик материала решетки

Для исследования решеток тоководов напряженно-деформированного состояния приходится решать статически неопределимые задачи достаточно высокой степени неопределенности. В основу методик решения статически неопределимых задач, как с использованием программных комплексов, так и в случае применения инженерных методик, положены системы разрешающих уравнений. Коэффициентами этих систем являются или коэффициенты жесткости (в случае использования метода перемещений), или коэффициентами податливости (при применении метода сил).

Теоретически коэффициент жесткости c определяется как коэффициент пропорциональности между перемещением Δ и усилием P

$$P = c \cdot \Delta \quad (1)$$

При растяжении стержня его коэффициент жесткости может быть определен по формуле:

$$c = \frac{EF}{l} \quad (2)$$

где F – площадь поперечного сечения; l - его длина.

Точность решения разрешающих систем определяется точностью задания коэффициентов жесткости. Величины коэффициентов жесткости, согласно выражению (2), пропорциональны модулю упругости материала токоотвода. В конечном итоге, погрешность определения уровня НДС, распределение напряжений в элементах токоотвода (жилках) зависит от точности определения значений модуля упругости E .

Задачи исследования состояли в разработке методики определения механических характеристик материала решеток токоотводов на основе экспериментальных данных. Основное внимание было уделено нахождению значения модуля упругости E .

На предыдущих этапах исследования были проведены экспериментальные исследования по определению механических характеристик материалов токоотвода на модельных образцах. Они представляли собой пластины длиной 40–50мм, шириной 20мм и толщиной 3мм. На испытательной машине образцы подвергались растягивающим нагрузкам и определялась диаграмма «нагрузка-перемещение» $P = f(\Delta)$. На основе этой диаграммы строилась диаграмма «напряжение-деформация» $\sigma = f(\varepsilon)$. По диаграмме $\sigma = f(\varepsilon)$ определялись механические характеристики материалов токоотвода.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что на величину модуля упругости оказывают влияние многие факторы. Одним из основных факторов являлось время дисперсионного хранения, при котором происходит затверждение материала.

Для одних сплавов, вначале идет понижение значений, потом – увеличение, затем снова - уменьшение значений модуля упругости. На относительно небольших временных участках, как правило, расположенных в середине тридцатидневного хранения, наблюдались постоянные значения модуля упругости, за которыми следовало скачкообразное изменение величин модуля упругости. Аппроксимировать эти значения возможно параболой второй степени и выше.

Для других технологических операций зависимость величины модуля упругости от времени дисперсионного хранения может быть аппроксимировано линейной функцией. Относительно этой линейной функции можно выделить участки монотонного возрастания и убывания величин модуля упругости.

Увеличение значений модуля упругости при времени хранения около месяца могло достигать 40%.

На рис.1 показаны модельные образцы, на которых определялись механические характеристики материала решеток токоотводов.

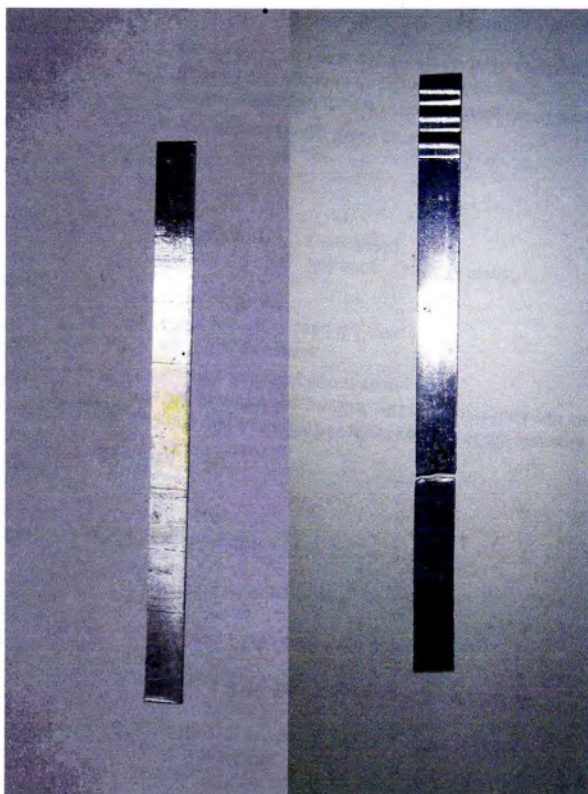


Рисунок 1 – Модельные образцы, на которых определялись механические характеристики материала токоотвода

Значения модуля упругости материалов токоотводов, определенных на модельных образцах, лежало в диапазоне от $1,1 \cdot 10^4$ МПа до $2,84 \cdot 10^4$ МПа.

В процессе эксплуатации токоотводы подвергаются различным нагрузкам. Одним из видов эксплуатационных нагрузок является тепловое воздействие. Анализ результатов экспериментальных исследований на образцах различных сплавов при их искусственном старении показал следующее. Значения модуля упругости зависят от времени теплового воздействия. Вначале, с увеличением времени воздействия, значения модуля упругости возрастают в 2–5 раз по сравнению с первоначальным временем изготовления промышленного образца, а в дальнейшем, величина модуля упругости может уменьшаться в 2–3 раза.

На данном этапе исследований были проанализированы экспериментальные данные, проведенных не на модельных или на промышленных образцах, а на готовых конструкциях токоотводов. Испытанию подвергались положительные токоотводы $P1+$, $W1+$, $Wt+$, $D1+$. Одним концом токоотвод заземлялся, а ко второму прикладывалась растягивающая сила. Замерялись перемещения второго края токоотвода. Для каждого токоотвода были получены диаграммы «нагрузка-

перемещение» $P = f(\Delta)$. Были определены предельные нагрузки, при которых жилы решетки токоотвода разрывались.

На рис.2 представлена исходная (до испытания) конструкция решеток $D1+$.

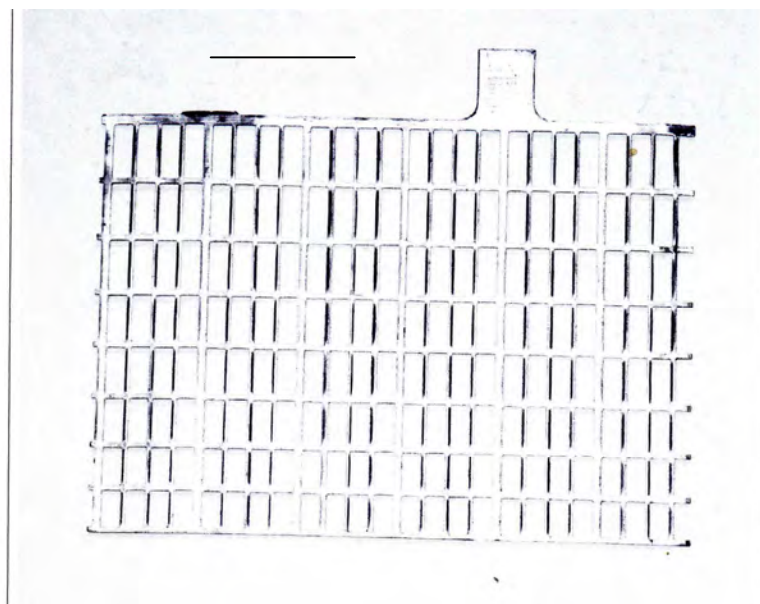


Рисунок 2 – Исходная конструкция решетки токоотвода $D1+$
1-решетка, 2-ушко

Для дальнейшего анализа результатов экспериментальных исследований были выбраны экспериментальные данные для токоотвода $D1+$. Конструкция токоотвода $D1+$ отличалась от конструкции остальных токоотводов своей простотой. В ней имелись только горизонтальные и вертикальные жилки. Токоотводы $W1+$, $Wt+$, кроме вертикальных (или горизонтальных) жилок, имели наклонные жилки. В токоотводе $P1+$ нет ни горизонтальных, ни вертикальных жилок. Решетка токоотвода $P1+$ представляет собой ромбовидную форму, в отличие от других токоотводов, где жилки образуют или прямоугольник, или параллелограмм.

Конструкция токоотвода $D1+$ имела семь горизонтальных и двадцать пять вертикальных жилок, при условии, что токоотвод располагался ушком вверх. Все горизонтальные жилки имели одни и те же размеры: длину $-1,44 \cdot 10^{-1} м$, ширину $-1 \cdot 10^{-3} м$, толщину $-9 \cdot 10^{-4} м$. Вертикальные жилы имели 21 узких и четыре широких жилок. Их длина равнялась $1,18 \cdot 10^{-1} м$, толщина $-9 \cdot 10^{-4} м$. Узкие жилы имели ширину (протяженность вдоль плоскости решетки) $-1,16 \cdot 10^{-3} м$, широкие $-1,9 \cdot 10^{-3} м$.

В экспериментальных исследованиях токоотводы нагружались в двух направлениях: вдоль ушка и поперек ушка.

На рис.3 представлена диаграмма растяжения решетки $D1+$ на 16-й день после изготовления при испытаниях на разрыв при приложениях нагрузки вдоль(1) и поперек(2) ушка.

При нагружении токоотвода вдоль ушка прямолинейный участок диаграммы $P = f(\Delta)$ сохранялся до нагрузки $P = 800\text{Н}$. При этом перемещение края токоотвода составило $\Delta = 1,88 \cdot 10^{-2}\text{м}$.

При нагружении токоотвода поперек ушка линейность диаграммы нарушалась при нагрузке $P = 420\text{Н}$, что соответствовало перемещению второго края токоотвода $\Delta = 9 \cdot 10^{-3}\text{м}$.

На основании приведенных экспериментальных данных с использованием формулы (2), были определены экспериментальные значения коэффициентов жесткости решетки токоотвода $D1+$ в двух направлениях: вдоль ушка $-c_a = 4,26 \cdot 10^4\text{Н/м}$, поперек ушка $-c_n = 4,67 \cdot 10^4\text{Н/м}$.

Значения коэффициентов жесткости, определенные по формуле (2), обычно называют экспериментальными. Здесь предпринята попытка охарактеризовать их с других позиций, предав им физический смысл.

На значениях коэффициентов жесткости отобразились все особенности технологического процесса - начиная с химического состава и заканчивая квалификацией оператора. Поэтому полученные значения можно охарактеризовать как технологический коэффициент жесткости.

Практически равные значения коэффициентов жесткости, полученные при испытаниях вдоль и поперек ушка, позволяют сделать заключение о том, что действие растягивающей силы воспринимается не только жилами, параллельными направлению ее действия, но и жилами, расположенными перпендикулярно направлению ее действия. При таком подходе можно полученные значения коэффициентов жесткости характеризовать как конструктивные коэффициенты жесткости.

Равенство коэффициентов жесткости позволяет сделать несколько предположений о расчетных схемах решеток токоотвода.

Расчетная схема, с одной стороны, должна удовлетворять простоте задания исходных данных, с другой стороны, иметь максимальное приближение к схеме работы токоотвода в реальных условиях эксплуатации. В данном случае нагружение токоотвода вдоль и поперек ушка.

Расчетную схему токоотвода $D1+$, благодаря своей простоте конструкции, в первом приближении можно рассматривать как набор горизонтальных и вертикальных жил. Внешняя нагрузка воспринимается только теми жилками, которые параллельны направлению нагрузки. Нагрузка поперек ушка действует на горизонтальные жилки, нагрузка вдоль ушка – на вертикальные жилки. Нет взаимовлияния между жилками. Теоретически, это соответствует тому, что коэффициент Пуассона $\mu = 0$.

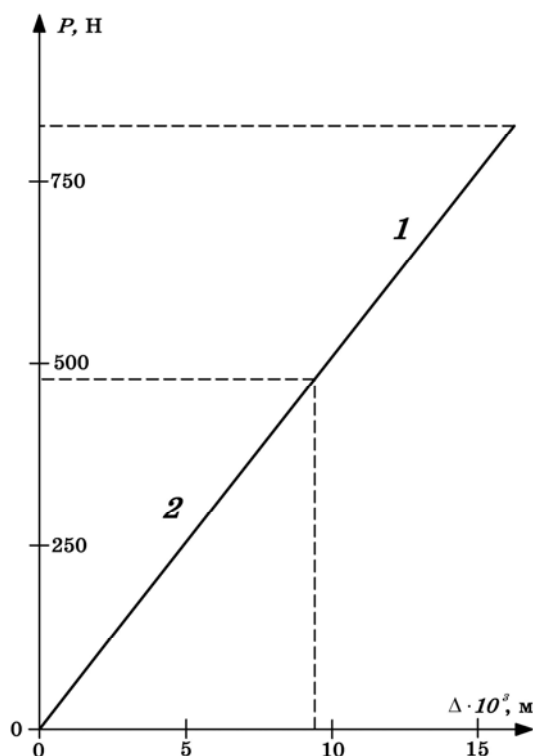


Рисунок 3 – Диаграмма растяжения решетки DI+ на 16-й день после изготовления при испытаниях на разрыв при приложениях нагрузки вдоль(1) и поперек(2) ушка

Жилы токоотвода представляют собой одномерные элементы конструкции. Для них применима формула (2). Из нее можно получить выражение для определения значения модуля упругости в виде:

$$E = c \frac{l}{F} \quad (3)$$

Если в выражение (3) подставлять экспериментальные значения коэффициентов жесткости, то будут получаться значения модуля упругости, которые также как и значения коэффициентов жесткости можно характеризовать как технологические или конструктивные.

При нагружении поперек ушка $c_n = 4,67 \cdot 10^4$ Н/м, длина $l_n = 1,44 \cdot 10^{-1}$ м, а сумма площадей горизонтальных жилок $F_n = 9 \cdot 10^{-6}$ м². Для этих значений величина модуля упругости при действии силы поперек ушек, определенная по формуле (3), составила $E_n = 7,47 \cdot 10^8$ Н/м².

При нагружении вдоль ушка $c_v = 4,26 \cdot 10^4$ Н/м, длина $l_v = 1,18 \cdot 10^{-1}$ м, сумма площадей вертикальных жилок $F_v = 2,88 \cdot 10^{-5}$ м². Значение модуля упругости при действии силы вдоль ушка $E_v = 1,75 \cdot 10^8$ Н/м². Величина модуля упругости при действии силы поперек ушка в 4,3 раз превосходит значение модуля упругости при действии силы вдоль ушка.

Следующей расчетной схемой на пути приближения к схеме работы токоотвода в реальных условиях эксплуатации, может служить расчетная схема, в которой предполагается взаимодействие горизонтальных и

вертикальных жилок. Это взаимодействие можно учесть с помощью коэффициента Пуассона, приняв его значение $\mu \neq 0$.

Теоретически, для сплошной, а не дискретной конструкции, максимальное значение ее материала $\mu = 0,5$. Это означает, что в направлении, перпендикулярном действию внешней нагрузки, деформация элементов составляет 50 % от деформации вдоль направления действия нагрузки. Практически, в направлении действия нагрузки участвует 100 % площади жилок, в перпендикулярном направлении – 50 % площади жилок. При таком подходе были получены значения модуля упругости поперек ушка $E_n = 2,88 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$, вдоль ушка $E_g = 1,52 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$. Соотношение между величинами модулей упругости снизилось с 4,3 до 1,9 раза.

Анализ результатов проведенных выше исследований позволяет предположить, что данную конструкцию токоотвода D1+ можно рассматривать не как дискретную, а как сплошную, непрерывную конструкцию. Размеры ячеек, образованные пересечением горизонтальных и вертикальных жилок, практически на порядок меньше общей длины и ширины решеток. Расчетной схемой конструкции может служить пластина. Эта пластина - не изотропна, а ортотропна. Значение модулей упругости в разных направлениях имеют не одинаковые величины.

Необходим также учет величины модуля сдвига, значение которого может быть определено по формуле:

$$G = \frac{\sqrt{E_n E_g}}{2(1 + \mu)} \quad (4)$$

Для рассмотренной конструкции D1+ $\mu = 0,5$, $E_n = 2,6 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$, $E_g = 1,52 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$, $G = 0,7 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$.

Временное сопротивление при нагружении вдоль ушка $\sigma_B = 2,8 \cdot 10^7 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$, а при нагружении поперек ушка - $\sigma_B = 4,7 \cdot 10^7 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

Временное сопротивление при нагружении поперек ушка в 1,7 раза больше, чем при нагружении вдоль ушка.

На рис.4 показаны характерные виды разрушения при испытаниях на разрыв в направлениях вдоль и поперек ушка.

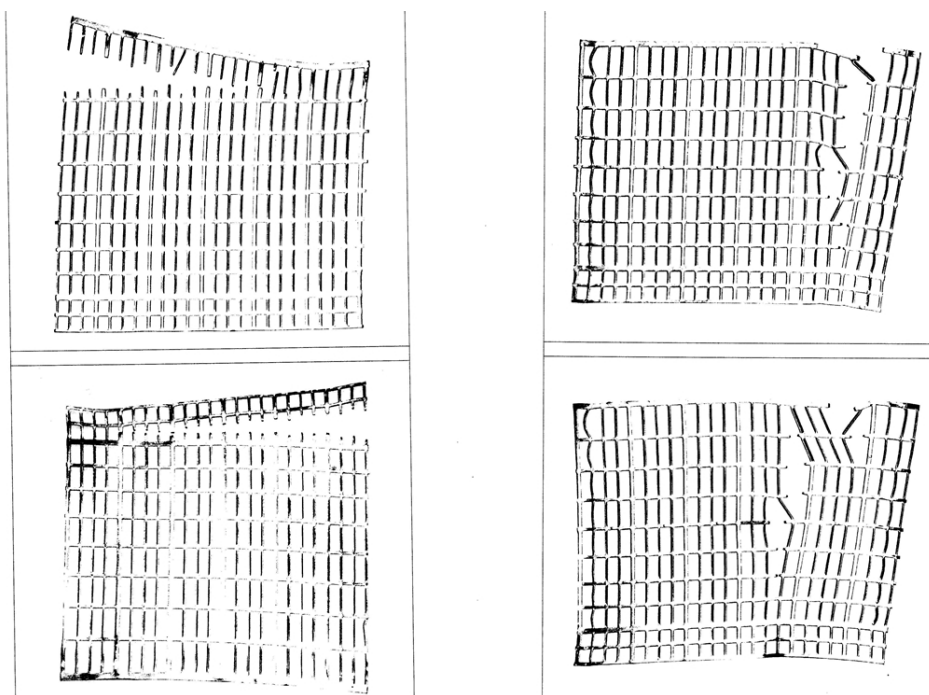


Рисунок 4 – Характерный вид разрушения решетки D1+ при испытаниях на разрыв в направлении вдоль (первая колонка) и поперек ушка (вторая колонка).

Выводы

Предложено значение механических характеристик материала решеток определять в зависимости от расчетной схемы.

Одномерная расчетная схема (стержень), соответствующая дискретной модели, характеризуется только модулем упругости. При нагружении вдоль ушка значение модуля упругости $E_B = 1.75 \cdot 10^8 \frac{H}{M^2}$, при действии силы поперек ушка $E_{II} = 7.47 \cdot 10^8 \frac{H}{M^2}$.

Для двумерной расчетной схемы (пластина), соответствующей континуальной модели, кроме модулей упругости в разных направлениях действия внешней силы, расчетная схема дополнительно характеризуется модулем сдвига и коэффициентом Пуассона. $\mu = 0,5$, $E_n = 2,6 \cdot 10^8 \text{H}/\text{M}^2$, $E_g = 1,52 \cdot 10^8 \text{H}/\text{M}^2$, $G = 0,7 \cdot 10^8 \text{H}/\text{M}^2$. Полученные значения механических характеристик материала решеток предлагается называть технологическими или конструктивными.

Предельное напряжение при нагружении вдоль ушка $\sigma_B = 2.8 \cdot 10^7 \frac{H}{M^2}$, при нагружении поперек ушка - $\sigma_B = 4.7 \cdot 10^7 \frac{H}{M^2}$.

Направление дальнейших исследований

Предложенные расчетные схемы будут использованы для исследования напряженно-деформированного состояния и определение критических нагрузок потери устойчивости первоначальной формы решеток токоотвода.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.Семененко В.П., Тарасов С.В. Исследование напряженно-деформированного состояния и устойчивости первоначальной формы решеток токоотводов в аккумуляторах-энергонакопителях.
- 2.Сучасні технології металургії. Наукові вісті №16(2013). Дніпропетровськ. – Н МетАУ, 2013. – с 40-50. Исследования по определению прочности тоководов различных типов на разрыв. Отчет ЗАО «Вести-Днепр», с 27