

М. А. Шрайбер, В. Н. Иванов, Д. А. Ягудин

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ СТАРЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. Обоснована методология и разработан алгоритм моделирования многослойной изоляции тяговых электродвигателей (ТЭД), который является простым, но многообещающим инструментом, позволяющим применять стратегии моделирования зоны сцепления слоев при инженерном анализе проблем возникновения и роста трещин, используя возможности метода конечных элементов. Результаты моделирования распространения усталостного повреждения в режимах нормальных и касательных напряжений, а также в смешанном режиме нагружения показывают, что закон накопления усталостных повреждений различается для распространения расслоения в разных режимах из-за отличий в механизме развития. Следует отметить, что разработка эффективной модели накопления усталостных повреждений требует большого объема экспериментальных данных, в которых в настоящее время ощущается острый дефицит.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, изоляция, термомеханические напряжения, старение изоляции, усталостные повреждения, трещинообразование

Для цитирования: Шрайбер, М. А. Конечнo-элементная модель старения изоляции тяговых электродвигателей локомотивов / М. А. Шрайбер, В. Н. Иванов, Д. А. Ягудин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 172–178. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_172.

Моделирование развития трещины происходит по узлам, поскольку на каждом этапе моделирования рассматривается только одна пара узлов. В результате определение скорости высвобождения энергии деформации осуществляется исключительно для конкретной пары узлов, что способствует упрощению анализа экспериментальных данных. С другой стороны, идентификация пары узлов в вершине трещины требует применения сложных алгоритмов, отслеживающих распространение фронта трещины. Это приводит к снижению вычислительной эффективности моделей.

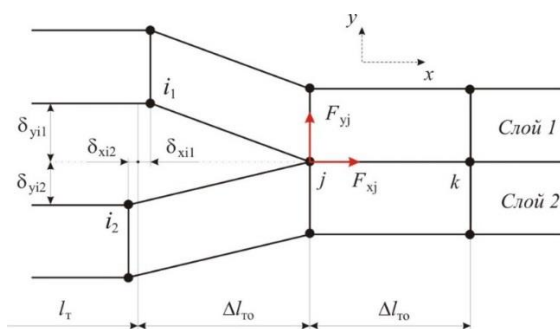


Рис. 1. Эскиз применения метода 2D четырехузловых элементах

В моделях распространения усталостного повреждения изоляции ТЭД с помощью теории линейной упругой механики разрушения в дополнение к принятым учитываются следующие допущения [1-5]:

1. Узловые точки верхней и нижней граней на потенциальных путях трещин имеют одинаковые координаты, и для этих пар узлов заранее определена формулировка связующего контакта;

2. Скорость высвобождения энергии деформации G_d на фронте трещины, вычисляется численными методами.

На рисунке 1 показано применение метода расчета для двухмерных четырехузловых элементов. Узел i разделен на два узла i_1 и i_2 из-за образования трещины. Стрелки изображают силы F_{xj} и F_{yj} , действующие в соответствующем узле.

Предполагается, что после роста трещины от узла j до узла k , состояние смещения за вершиной новой трещины, то есть узел k , приблизительно идентично состоянию смещения за вершиной старой трещины, то есть узлу j , перед расширением трещины, которое означает, что смещения узлов j_1 и j_2 после роста трещины будут равны смещениям узлов i_1 и i_2 .

Компоненты нагружения нормальными напряжениями для скорости высвобождения энергии деформации $G_{дн}$ могут быть рассчитаны как:

$$G_{дн} = -\frac{1}{2\Delta l_{то}} F_{yj} (\delta_{yi1} - \delta_{yi2})^2, \quad (1)$$

где δ_{yi1} и δ_{yi2} – компоненты смещения узлов i_1 и i_2 по оси y , m ;

$\Delta l_{то}$ – расстояние между узлами i и j , m .

Компоненты нагружения касательными напряжениями для скорости высвобождения энергии деформации и $G_{дк}$ могут быть рассчитаны как:

$$G_{дк} = -\frac{1}{2\Delta l_{то}} F_{xj} (\delta_{xi1} - \delta_{xi2})^2, \quad (2)$$

где δ_{xi1} и δ_{xi2} – компоненты смещения узлов i_1 и i_2 по оси x , m .

Вычисления выполняются поэтапно, а уравнения квазистатического равновесия решаются неявным образом путем обращения к итерации Ньютона-Рафсона. По мере продвижения трещины сетка у ее вершины непрерывно смещается, чтобы все время быть в центре текущей вершины трещины. После каждой перестройки сетки смещения, напряжения, пластические деформации и эффективные пластические деформации переносятся со старой сетки на новую.

Очевидно, что вблизи зоны сцепления слоев изоляции размер ячейки должен составлять малую часть размера этой зоны. Затем сетка может постепенно укрупняться от вершины трещины. Оптимальную градацию сетки можно вывести из стандартных оценок ошибки интерполяции. В частности, оптимальный размер сетки стремится к нулю по мере приближения к вершине трещины. Градация размера до расстояний порядка толщины зоны сцепления, ниже которых размер элемента остается постоянным и составляет часть размера этой зоны.

Сетки строятся автоматически, сначала путем объединения всех ребер, определяющих границу области анализа, включая склоны трещины, с требуемой узловой плотностью. Геометрия этих краев постоянно обновляется, чтобы отслеживать продвижение трещины. Внутренние сетки строятся путем вставки узлов в гексагональную решетку с заданной локальной плотностью узлов.

Предложенная численная модель основана на предположении, что между слоями существуют несовершенные богатые смолой межфазные слои, внутри которых развиваются механизмы расслоения. Основная идея состоит в том, чтобы ввести критерий разрушения в конечно-элементный анализ, чтобы определить, где и когда начинается расслоение и как оно распространяется. Этот же критерий, конечно, можно применять для моделирования потенциального роста существующих начальных трещин при определенных условиях

нагружения и, следовательно, для оценки остаточной жесткости и характеристик изоляции тяговых электродвигателей.

Текущее напряженное состояние вычисляется с использованием модели зоны сцепления слоев изоляции ТЭД. Затем применяются критерии отказа, чтобы определить, произошел ли отказ, используя напряженное состояние из предлагаемой модели. Если отказ произошел, свойства изоляции ТЭД соответственно деградируют в соответствии с моделью повреждений. Если отказа нет, то обновленные переменные сохраняются для следующего приращения и выводятся обратно в код конечного элемента. Алгоритм полной модели повреждения и разрушения изоляции ТЭД показан на рисунке 2.

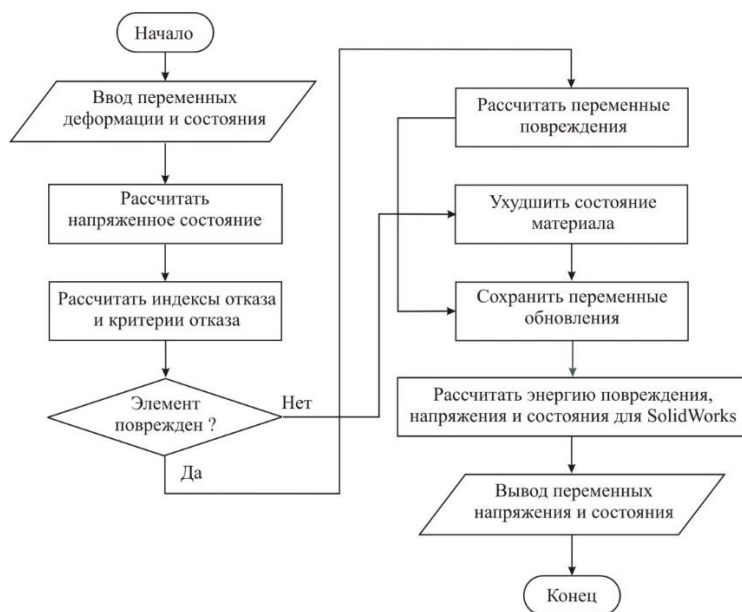


Рис. 2. Алгоритм модели определения повреждения изоляции ТЭД

На уровне слоя моделируются два явления повреждения: неупругое поведение, вызванное микроскопическими повреждениями, и растрескивание слоя пропитки. Предполагается, что первое происходит только из-за напряжений сдвига, тогда как растрескивание слоя пропитки происходит из-за комбинации сдвиговых и нормальных напряжений с учетом коррекции сжимающих напряжений. Все напряжения относятся к напряжениям слоя в локальной системе координат, тогда как «нагрузка» относится к продольной растягивающей нагрузке, приложенной к изоляции ТЭД, если не указано иное.

Предлагаемая модель включает:

1. Монотонное снижение сцепления слоев изоляции. Как правило, при увеличении $D_{и}$ соответствующие модули упругости уменьшаются.
2. Постепенное рассеивание энергии деформации по мере развития повреждения. Энергия деформации должна быть удалена из системы по мере открытия трещин.
3. Деформации из-за раскрытия трещин распределены по элементу (элементу сопряжения) равномерно.

Модель изоляции ТЭД, разработанная для описания наблюдаемого повреждения от расслаивания, является макроскопической. Микроскопическая модель, описывающая каждую отдельную микротрещину, совершенно невозможна из-за большого количества микротрещин, которые сливаются в макротрещину или расслоение. Был разработан математический подход к прогнозированию разрушения, который дает меру среднего микроскопического повреждения изоляции ТЭД. Мера считается дополнительной переменной внутреннего состояния и включается как часть определяющих отношений для изоляции ТЭД. Следовательно, в дополнение к деформации и температуре также указывается микроскопическое повреждение для конкретной микроскопической пустоты. Этот подход

охватывает кинетику разрушения, которая включает в себя микроскопическое поведение и может, при необходимости, ввести конкретную зависимость скорости высвобождения энергии деформации в определяющее поведение изоляции ТЭД. Процесс разрушения автоматически встроен в зависимость напряжения-деформация изоляции ТЭД, т. е. в насыщенном пропиточным составом слое.

На рисунке 3 приедены результаты расчета напряженно-деформируемого состояния пропиточного слоя изоляции $b_{\text{сп}} = 0,5$ мм.

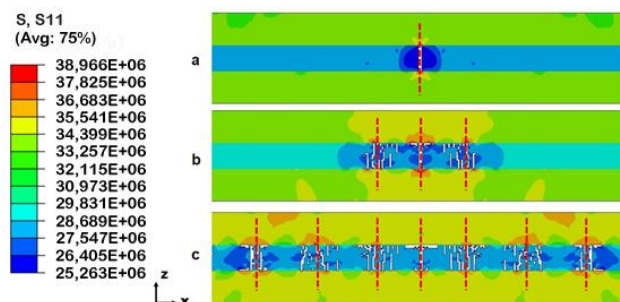


Рис. 3. Усталостные трещины при размере слоя $b_{\text{сп}} = 0,5$ мм
a - $N_i = 10$ циклов; b - $N_i = 100$ циклов; c - $N_i = 1000$ циклов

Поведение материала пропиточного слоя в этом случае приближается к параметрам однородного материала. Возникшая трещина визуализируется как линия, охватывающая весь слой, или как группа дефектов, возникающих одновременно. За вершиной трещины существенное влияние оказывают сжимающие радиальные напряжения, которые увеличиваются по значению и количеству. Подобные концентрации напряжений наблюдались экспериментально. Кроме того, наблюдаются колебания радиального напряжения от напряжения растяжения до напряжения сжатия вблизи вершины трещины. Площадь под радиальными напряжениями в области контакта слоев практически одинакова, что подчеркивает одинаковую скорость выделения энергии для распространения трещины.

Рисунок 4 отражает изменение деформации пропиточного слоя изоляции при линейном увеличении приложенного напряжения вплоть до полного его разрушения при различном количестве циклов нагружения.

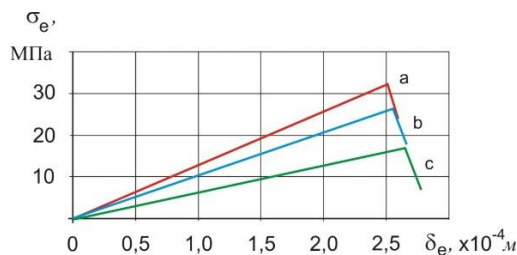


Рис. 4. Зависимость напряжение-деформация при размере слоя $b_{\text{сп}} = 0,5$ мм
a - $N_i = 10$ циклов; b - $N_i = 100$ циклов; c - $N_i = 1000$ циклов

Движение точек сжатия на модели можно исследовать более подробно, рассматривая распределение напряжений вдоль объемных элементов, прилегающих к границе раздела слоев. Компоненты напряжения в соседних элементах очень близки к компонентам напряжений в связанных элементах, поскольку соседние объемные элементы очень малы.

Радиальные напряжения вдоль границы раздела при толщине пропиточного слоя $b_{\text{сп}} = 1,0$ мм в три разных момента времени показаны на рисунке 5.

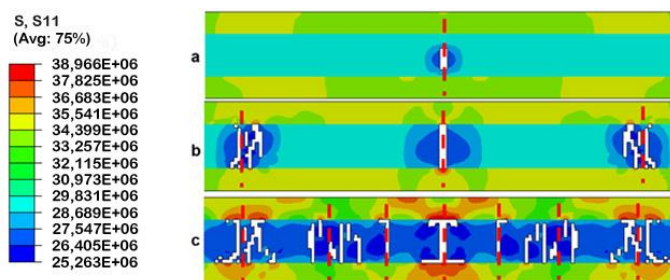


Рис. 5. Усталостные трещины при размере слоя $b_{cp} = 1,0$ мм
а - $N_i = 10$ циклов; б - $N_i = 100$ циклов; в - $N_i = 1000$ циклов

Результаты моделирования циклических напряжений и деформаций представлены на рисунке 6. Эти две модели с толщиной пропиточного слоя $b_{cp} = 0,5$ мм и $b_{cp} = 1,0$ мм имеют различную последовательность возникновения трещин, но места трещин и среднее расстояние между трещинами одинаковы, которое оказалось равным 1,1 мм.

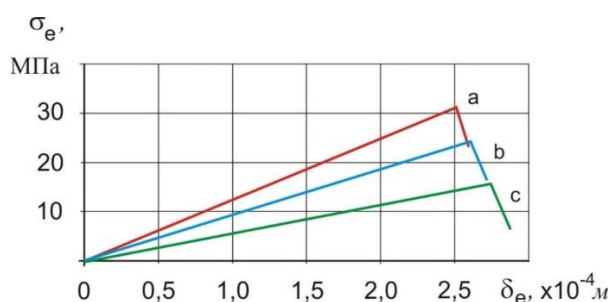


Рис. 6. Зависимость напряжение-деформация при размере слоя $b_{cp} = 1,0$ мм
а - $N_i = 10$ циклов; б - $N_i = 100$ циклов; в - $N_i = 1000$ циклов

Последний случай расчета, показанный на рисунке 7, имеет самый толстый пропиточный слой, равный $b_{cp} = 1,5$ мм. Здесь до полного его разрушения возникает две трещины. Как и в других моделях, было проведено три процесса расчета. Полученные результаты показывают среднюю длину растрескивания около 2,2 мм.

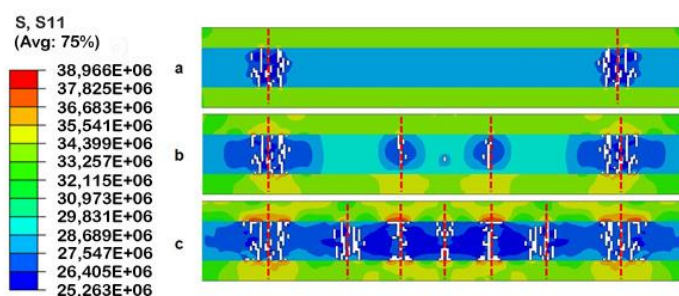


Рис. 7. Усталостные трещины при размере слоя $b_{cp} = 1,5$ мм
а - $N_i = 10$ циклов; б - $N_i = 100$ циклов; в - $N_i = 1000$ циклов

Из-за разницы в толщине материала возникновение трещин расчет с большим размером пропиточного слоя подтверждает его меньшую прочность, которая наблюдается при деформации ниже, чем при деформации слоя меньшей толщины. Причина в том, что трещина в середине возникает раньше всех других трещин.

Поскольку об усталостных свойствах основных компонентов изоляции ТЭД мало что известно, то невозможно сделать надлежащую оценку его усталости. Оценка срока службы с точки зрения того, сколько необходимо циклов до отказа по данным моделирования, сделать невозможно. Однако на основании результатов моделирования можно сделать некоторые выводы о различных изоляционных материалах. Пропиточный состав - единственный компонент, который, кажется, всегда достигает предела текучести. Однако максимальные

амплитуды напряжения в пропиточном составе указывают на то, что он будет находиться в области малоцикловой усталости. Одна из причин заключается в том, что пластичность, предел прочности и модуль упругости пропиточного состава низкие. Другая причина в том, что он не равномерно распределен по объему паза между всеми проводниками и стеклолентой.

Следует отметить, что места высоких значений градиента температуры очень близки к тем местам, где основные компоненты изоляции имеют максимальную амплитуду напряжений. Исходя из этого, скорее всего, здесь возникнут трещины и расслоения изоляции ТЭД.

Согласно результатам моделирования, пропиточный состав с учетом наличия стеклоленты достигает предела прочности на разрыв всего за несколько циклов и, таким образом, появляются расслоения изоляции ТЭД. Трещины и расслоения, вероятно, возникнут еще до пластической деформации. Область максимального касательного напряжения также является местоположением в изоляции ТЭД, где пропиточный слой и стеклолента, имеющие тонкий соединенный слой подвержены процессу расслоения, что подтверждается аналитическими выражениями для касательного напряжения сдвига, который гласит, что чем меньше толщина соединенного слоя, тем выше касательные напряжения сдвига. С течением времени изоляция ТЭД будет иметь почти такую же температуру, как и медный проводник, и, следовательно, в ней будут возникать более высокие напряжения.

Список литературы

1. **Киселев, И. Г.** Тепловая модель асинхронного тягового электродвигателя тепловоза. / Киселев И. Г., Курилкин Д. Н., Шрайбер М. А. // Известия петербургского университета путей сообщения. – 2021. – Т.18. - №4. – с.460 – 468.
2. **Шрайбер, М. А.** Влияние термомеханической нагрузки на старение изоляции тяговых электродвигателей тепловозов // Известия петербургского университета путей сообщения. – 2022. – Т.19. - №2. – с.242 – 248.
3. **Курилкин, Д. Н.** Моделирование механических напряжений в обмотках тяговых электродвигателей тепловозов. / Курилкин Д. Н., Романова А. А., Шрайбер М. А. // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2021. - №2. – с.46 – 48.
4. **Шрайбер, М. А.** Моделирование воздействия неоднородности материала изоляции тяговых электрических машин на процессы роста усталостных трещин // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. - №3(99). – с. 42 – 45.
5. **Шрайбер, М. А.** Моделирование напряжений в изоляции ТЭД тепловозов. / Шрайбер М. А., Грачев В. В., Грищенко А. В., Базилевский Ф. Ю. // Вестник транспорта Поволжья. – 2025. - №2 (110). – с.147 - 151.

References

1. **Kiselev, I. G.** Thermal model of an asynchronous traction electric motor of a diesel locomotive. / Kiselev I. G., Kurilkin D. N., Shraiber M. A. // Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering. - 2021. - Vol. 18. - No. 4. - pp. 460 - 468.
2. **Shraiber, M. A.** Influence of thermomechanical load on the aging of insulation of traction electric motors of diesel locomotives // Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering. - 2022. - Vol. 19. - No. 2. - pp. 242 - 248.
3. **Kurilkin, D. N.** Modeling of mechanical stresses in the windings of traction electric motors of diesel locomotives. / Kurilkin D. N., Romanova A. A., Shraiber M. A. // Electronics and electrical equipment of transport. - 2021. - No. 2. - pp. 46 - 48.
4. **Shraiber, M. A.** Modeling the impact of inhomogeneity of insulation material of traction electric machines on the growth processes of fatigue cracks // Bulletin of Transport of the Volga Region. - 2023. - No. 3 (99). - pp. 42 - 45.
5. **Shraiber, M. A.** Modeling of stresses in the insulation of diesel locomotive traction motors. / Shraiber M. A., Grachev V. V., Grishchenko A. V., Bazilevsky F. Yu. // Bulletin of Transport of the Volga Region. - 2025. - No. 2 (110). - pp. 147 - 151.

M. A. Shrayber, V. N. Ivanov, D. A. Yagudin

FINITE ELEMENT MODEL OF THE AGING OF THE INSULATION OF LOCOMOTIVE TRACTION ELECTRIC MOTORS

Abstract. The methodology is substantiated and an algorithm for modeling multilayer insulation of traction electric motors is developed, which is a simple but promising tool that allows the application of layer adhesion zone modeling strategies in the engineering analysis of problems of the occurrence and growth of cracks, using the capabilities of the finite element method. The results of modeling the propagation of fatigue damage in normal and tangential stress modes, as well as in a mixed loading mode, show that the law of accumulation of fatigue damage differs for the propagation of delamination in different modes due to differences in the mechanism of development. It should be noted that the development of an effective model for the accumulation of fatigue damage requires a large amount of experimental data, which is currently in short supply.

Keywords: traction electric motor, insulation, thermomechanical stresses, insulation aging, fatigue damage, cracking

For citation: Shrayber, M. A. Finite Element Model of Aging of the Insulation of Locomotive Traction Electric Motors / M. A. Shrayber, V. N. Ivanov, D. A. Yagudin. // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya. – 2025. – № 4. – P. 172–178. – DOI 10.46973/1818-5509_2025_4_172.

Сведения об авторах

Шрайбер Марина Александровна

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ФГБОУ ВО РГУПС),
кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: goshapti4ka@yandex.ru

Иванов Валерий Николаевич

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ФГБОУ ВО РГУПС),
кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: lt@pgups.ru

Ягудин Данил Альтафович

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ФГБОУ ВО РГУПС),
кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»,
аспирант,
e-mail: 9gud1n@gmail.com

Information about the authors

Shrayber Marina Alexandrovna

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU),
Chair «Locomotives and Locomotive Engineering»,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
e-mail: goshapti4ka@yandex.ru

Ivanov Valerij Nikolaevich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU),
Chair «Locomotives and Locomotive Engineering»,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
e-mail: lt@pgups.ru

Yagudin Danil Altafovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU),
Chair «Locomotives and Locomotive Engineering»,
Postgraduate Student,
e-mail: 9gud1n@gmail.com