

Список литературы

- 1 Старовойтов, Э. И. Трехслойные стержни в терморadiационных полях / Э. И. Старовойтов, М. А. Журавков, Д. В. Леоненко. – Минск : Беларуская навука, 2017. – 275 с.
- 2 Старовойтов, Э. И. Цилиндрический изгиб прямоугольной трехслойной пластины в температурном поле / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки : междунар. сб. науч. тр. – Гомель, 2014. – Вып. 8. – С. 179–185.
- 3 Зеленая, А. С. Деформирование упругой трехслойной прямоугольной пластины со сжимаемым наполнителем / А. С. Зеленая // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – Сер. Естественные науки. – 2017. – № 6 (105). – С. 89–95.

УДК 629.423.33

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В КОНТАКТНОЙ ПАРЕ «ТОКОСЪЕМНИК ЛОКОМОТИВА – КОНТАКТНЫЙ ПРОВОД ЭЛЕКТРОСЕТИ»

И. И. КАПЛЮК

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Токосъем на электрическом подвижном составе сопровождается большим выделением тепла, из-за которого имеется опасность повреждения контактного провода вследствие пережога или отжига, что может привести к сбоям в движении поездов. Также чрезмерный нагрев ведет к повышенному износу токоведущих элементов полозов. При сравнительном анализе различных по форме и материалу токосъемных вставок обнаруживаются большие различия в их долговечности, что напрямую зависит от характеристик их взаимодействия с контактным проводом. Наличие трения в области контакта ведет к изменению температур как провода электросети, так и токосъемников, что приводит к дополнительным температурным деформациям.

Ранее было проведено большое количество экспериментальных исследований взаимодействий в системе «пантограф – контактный провод электросети». На их основе установлено, что к основным причинам нагрева провода и токосъемной вставки относятся:

- действие электрического тока, обусловленное «джоулевым» выделением тепла непосредственно в материале провода и перенос его посредством конвективного обмена в зоне контакта на токосъемную вставку;
- выделение тепла вследствие трения в зоне контакта в процессе скольжения токосъемника вдоль провода контактной сети;
- тепловое действие электродуговых и искровых явлений, сопровождающих токосъем при нарушении контакта между проводом и токосъемником или из-за наличия повреждений в области контакта.

Таким образом, износ токосъемной вставки и провода определяются механической и электрической составляющими, которые сопровождаются выделением тепла.

Ранее практически не рассматривались эффекты, связанные с сухим фрикционным нагревом контактных парных элементов токосъемных устройств. В то же время такой теоретический анализ может предшествовать комплексному изучению процессов съема тока с учетом механического (от контактного давления) и электрического (от токовой нагрузки) износов.

Современным эффективным инструментом в рассмотрении явлений, связанных с деформацией контактирующих тел с учетом тепловых явлений, является численное моделирование их взаимодействия. В данной работе поставлена задача по разработке и анализу конечноэлементных моделей контактирующих элементов кинематической пары «провод – токосъемная вставка» в среде пакета инженерного анализа ANSYS.

Используемый на практике провод имеет сложную форму поперечного сечения, связанную с особенностями его крепления. Однако в зоне контакта с угольной вставкой поверхность провода цилиндрическая. Поэтому с целью упрощения модели предполагалось, что провод электросети имеет круглое сечение. Длина участка провода принята равной 20 см, его радиус сечения 65 мм. Считалось, что начальный износ у моделируемого провода отсутствует. Модель токосъемной вставки представляла собой прямоугольный параллелепипед размерами 1040,743 см.

Физические характеристики элементов модели приняты следующими: провод из меди с модулем Юнга равным 100 ГПа и коэффициентом Пуассона 0,2; угольная вставка с модулем Юнга 10 ГПа, коэффициентом Пуассона – 0,24. Плотности материалов провода и вставки – 5529 и 1760 кг/м³ соответственно. Коэффициент трения в контакте принят равным 0,06, коэффициент теплопередачи – 70 Вт/(м²·К).

Задача динамического контактного взаимодействия тел представляет собой проблему значительной сложности даже без учета температурных явлений, так как площадка контакта при движении пантографа постоянно меняется. Этот факт также приводит к большой продолжительности расчетов. Поэтому были разработаны несколько вариантов моделей взаимодействия токоприемной вставки и контактного провода.

При постановке стационарной нелинейной задачи теплообмена в ANSYS Mechanical для упорядоченного конечно-элементного разбиения приняты следующие типы элементов: 20-узловой тепловой элемент SOLID90, а также TARGE170, CONTA174. Для сокращения расчетов рассматривалась половина объемной модели относительно ее оси симметрии. В области контакта принято сгущение конечно-элементной сетки. Общее количество элементов модели составило примерно 33000.

Была задана температура поверхности угольной вставки 70 °С и начальная температура контактирующих элементов, равная температуре окружающей среды 15 °С. В модели учитывался конвективный обмен с окружающей средой (воздух). Получено распределение температур в зоне контакта при нагревании поверхности угольной вставки с учетом температуры окружающей среды в установившемся режиме. Тестирование модели показало, что результаты конечно-элементного моделирования достаточно адекватно отображают распределение температур в элементах модели.

В ходе вычислений установлено, что тепловой поток быстро распространяется по контактному проводу вследствие его высокого коэффициента теплопередачи. Градиент температуры по длине провода через 0,1 с после начала контакта составляет около 20 °С/м.

Дальнейшее исследование проводилось в среде пакета ANSYS Workbench с помощью решателя Mechanical APDL. В результате разработана конечно-элементная модель, позволяющая осуществить совместный анализ полей напряжений и температур при влиянии сухого трения в процессе скольжения токосъемной вставки электровоза вдоль провода электросети.

Для анализа выбран тип анализа Transient Structural. При этом использовались ранее принятые характеристики и свойства модели. В качестве конечного элемента выбран линейный элемент связанных полей SOLID5, позволяющий производить учет прочностных степеней свободы совместно с температурой. Сетка создавалась линейным генератором сетки с размером конечного элемента 0,4 мм. Число конечных элементов модели составило около 85 000. В данной модели в дополнение к ранее описанным параметрам учитывались следующие характеристики материалов провода и токосъемной вставки: коэффициент теплового расширения – $16,7 \cdot 10^{-6}$ и $7,9 \cdot 10^{-6}$ 1/К, коэффициент теплопроводности – 380 и 150 Вт/м·К, коэффициент удельной теплоемкости – 383 и 708 Дж/кг·К. Начальный коэффициент трения в контакте увеличен до 0,2.

Чтобы обеспечить реальные условия работы провода, предполагается, что один из его концов закреплен, а у второго отсутствует вертикальное смещение. Сила натяжения провода принята равной 500 Н, сила прижатия вставки к проводу – 140 Н. Считалось, что токоприемник перемещается вдоль провода со скоростью 1 м/с.

Контактная пара назначена фрикционной, несимметричной с формулировкой «Augmented Lagrange». Было определено обязательное наличие контакта между телами в начальный момент времени. Чтобы обеспечить более устойчивый процесс счета, значение коэффициента нормальной жесткости тел по всей поверхности контакта уменьшено в 10 раз до 0,01 по сравнению со значением по умолчанию.

Для расчета плотности теплового потока, вызванного кулоновым трением, коэффициент рассеивания энергии принят равным 1. Весовой коэффициент распределения тепла, учитывающий особенности обмена тепла между контактной и целевой поверхностями, считался равным 0,5. Предполагалось, что при температуре 22 °С тела не имеют тепловых деформаций. Также данная температура задана в качестве начальной температуры тел.

Полученная модель позволила рассмотреть тепловыделение и его дальнейшее распределение по объему элементов при контактном взаимодействии, сопровождающемся трением. Отметим, что длительность одноразового расчета для интервала времени 0,5 с составила более 70 часов. В результате вычислений было обнаружено, что наибольшей нагрев достигается в зоне контакта, а ме-

сто пятна нагрева изменяется при движении вставки. Расчеты показали, что повышение температуры вставки в зоне контакта в первые 0,5 с от начала скольжения составляет около 14 градусов, что соответствует реализуемым на практике значениям. Заметное увеличение температуры провода наблюдается только вблизи области контакта. Это соответствует полученным ранее результатам теплового анализа. Данная модель позволила также произвести оценку значений напряжений, возникающих в результате скользящего контакта.

Разработанные модели в последующем могут быть использованы для усовершенствования конструкции узла токосъема.

УДК 539.3

СЭНДВИЧ-ПЛАСТИНА НА ОСНОВАНИИ ПАСТЕРНАКА

А. Г. КОЗЕЛ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Требования к применяемым конструкциям в транспортном и строительном комплексах постоянно растут, что приводит к появлению новых технологий или совершенствования старых. Трёхслойные конструкции, имеющие относительно малую массу, способны обеспечить не только заданные показатели прочности и жёсткости, но и хорошие звуко- и теплоизолирующие свойства, а также противостоять многим другим отрицательным факторам. Благодаря этому широкое использование получили сэндвич-пластины. Они могут изготавливаться из материалов с различными физико-механическими свойствами, которые варьируются в зависимости от необходимых характеристик и условий эксплуатации заданного изделия. Конструкции и технология производства сэндвич-пластин постоянно совершенствуются, наделяя данный строительный материал новыми свойствами, что вызывает необходимость уточнения их расчёта, включая температурные и радиационные воздействия, сложность деформируемого основания.

Ранее деформирование сэндвич-пластин было изучено при опирании на одноконстантное основание Винклера. Модель упругого основания Пастернака учитывает не только сжимаемость, но и его связность, поэтому предложенная постановка задачи является новой.

Здесь предложено решение краевой задачи об осесимметричном деформировании упругой круговой сэндвич-пластины с легким наполнителем на сложном основании.

Постановка задачи проводится в цилиндрической системе координат, связанной со срединной плоскостью наполнителя. В тонких несущих слоях принимаются гипотезы Кирхгофа, в несжимаемом по толщине наполнителе нормаль остается прямолинейной, не изменяет своей длины, но поворачивается на некоторый дополнительный угол $\psi(r)$. Наполнитель считается легким, т. е. не учитывается его работа в тангенциальном направлении. На контуре пластины предполагается жесткая диафрагма, которая препятствует относительному сдвигу слоев. Решение задачи сводится к нахождению прогиба пластины, относительного сдвига в наполнителе и радиального перемещения координатной плоскости, т. е. $w(r)$, $\psi(r)$, $u(r)$. Реакция основания описывается моделью Пастернака:

$$q_r(r) = -\kappa_0 w + t_f \Delta w, \quad (1)$$

где κ_0 , t_f – коэффициенты сжатия и сдвига; Δ – оператор Лапласа.

Уравнения равновесия и граничные условия в усилиях выведены из вариационного принципа Лагранжа с учетом (1):

$$L_2(a_1 u) = 0; \quad L_2(a_2 \psi - a_3 w_{,r}) = 0; \quad L_3(a_3 \psi - a_4 w_{,r}) - \kappa_0 w + t_f \Delta w = -q_0, \quad (2)$$

где q_0 – интенсивность внешней распределенной нагрузки; a_i – коэффициенты, учитывающие упругие и геометрические параметры слоев:

$$a_1 = \sum_{k=1}^3 h_k K_k^+; \quad a_2 = c^2 \left(2h_1 K_1^+ + \frac{2}{3} c K_3^+ \right); \quad a_3 = c \left[2h_1 \left(c + \frac{1}{2} h_1 \right) K_1^+ + \frac{2}{3} c^2 K_3^+ \right];$$

$$a_4 = 2h_1 \left(c^2 + c h_1 + \frac{1}{3} h_1^2 \right) K_1^+ + \frac{2}{3} c^3 K_3^+;$$