УДК 625.245.6

А. А. ОЛЬШЕВСКИЙ, кандидат технических наук, М. А. ОЛЬШЕВСКАЯ, аспирант, А. А. МИЛЬТО, студент, Брянский государственный технический университет, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОГЛОЩАЮЩЕГО АППАРАТА ПМКП-110

Разработан и внедрен в пакет конечно-элементного анализа DSMFEM программный модуль, позволяющий решать с учетом трения скольжения задачу контакта множества тел методом сил. Построены конечно-элементные модели для различного хода поглощающего аппарата, произведены расчеты с целью исследования НДС ПМКП-110 при различных нагрузках. Проведен анализ НДС исследуемого объекта, выявивший существенную неравномерность распределения контактных давлений на рабочих поверхностях.

Для соединения вагонов с локомотивом и между собой применяют ударно-тяговые механизмы (сцепки), которые передают тормозные и тяговые усилия при езде. Увеличение веса поездов и грузоподъемности вагонов, рост скорости их движения и интенсивности маневровых операций приводят к возникновению ударов большой силы, воспринимаемых сцепным устройством, эффективным средством снижения которой является применение специальных амортизаторов, обеспечивающих преобразование кинетической энергии соударяющихся вагонов в другие виды. Примером такого амортизатора является комбинированный поглощающий аппарат ПМКП-110 (рисунок 1).



Рисунок 1 – Устройство аппарата ПМКП-110: 1 – корпус; 2 – подвижные пластины; 3 – неподвижные пластины; 4 – клинья; 5 – нажимной конус; 6 – опорная плита; 7 – стяжной болт с гайкой; 8 – полимерные блоки; 9 – центрирующие пластины; 10 – опорный элемент

Фрикционная часть аппарата включает в себя корпус, подвижные пластины, неподвижные пластины, клинья, нажимной конус, опорную плиту.

Конструкция аппарата такова, что при наличии нагрузки все элементы фрикционной части устройства приходят в движение, растрачивая максимальное количество энергии на преодоление сил трения скольжения. Внешняя нагрузка прикладывается к нажимному конусу и подвижным пластинам. Нажимной конус, двигаясь под действием внешних сил, начинает давить на клин, в то время как с обратной стороны на клин давит опорная плита, прижимаемая к нему сжатыми полимерными блоками. Конус и плита вместе прижимают клин к неподвижной пластине, которая, в свою очередь, прижимает подвижную пластину к корпусу. Основное поглощение энергии происходит на поверхностях трения подвижной и неподвижной пластин. Поглощение энергии на поверхностях нажимного конуса и опорной плиты невелико, однако силы трения на этих поверхностях существенно влияют на усилия взаимодействия остальных деталей, и изменение направления сил трения на этих поверхностях определяет существенное различие сил на аппарате при прямом и обратном ходах.

Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) осуществлялся методом конечных элементов (МКЭ). Конечно-элементная дискретизация выполнена с использованием восьмиузловых конечных элементов. В расчетную схему аппарата включены детали клиновой системы аппарата: подвижная пластина, неподвижная пластина, клин, нажимной конус, опорная плита, а также часть корпуса – от открытого края до упора неподвижной пластины. С учетом наличия двух плоскостей симметрии расчетная схема сокращена до четверти сборочной модели аппарата путем введения дополнительных связей.

Действие полимерных блоков на опорную плиту заменено силой, пропорциональной величине хода аппарата с учетом начальной затяжки (от 200 до 500 кН).

В модели введено пять контактных поверхностей. В зависимости от хода аппарата число контактных пар варьируется от 950 до 1658.

Для учета сил трения в расчетной схеме указаны векторы направления скольжения поверхностей контакта, а также коэффициенты трения для контактных поверхностей:

 – 0,417 – для контакта сталь-сталь на рабочих поверхностях;

- 0,394 – для контакта сталь-керамика;

 – 0,197 – для контакта сталь-сталь на вспомогательных поверхностях [1].

Задание контакта производится с помощью контактных конечных элементов, которые строятся на шести узлах: активном (n_a) , пассивном (n_p) и четырех вспомогательных $(n_1 - n_4)$. Активный узел принадлежит одной поверхности контакта, а пассивный и вспомогательные – другой [2]. Активный и пассивный узлы расположены в непосредственной близости друг от друга. В случае соприкосновения поверхностей на них действуют контактные силы. Вспомогательные узлы нужны для определения направления нормали к поверхности и площади поверхности, связанной с контактным элементом (рисунок 2).

Одним из распространенных методов решения контактной задачи в конечно-элементной постановке является метод нижней релаксации с пошаговым приложением нагрузки [3]. Его основным недостатком является повышенный объем требуемых вычислений. Метод верхней релаксации лишен этого недостатка, однако позволяет учесть трение в контакте лишь приближенно. В целом, обе модификации метода слишком требовательны к вычислительным ресурсам и не позволяют с приемлемой скоростью решать контактную задачу для исследуемого поглощающего аппарата. Кроме того, принципиально важной для метода релаксации является большая разница между жесткостями деталей клиновой системы и корпуса.



Рисунок 2 - Расположение узлов контактного элемента

Сравнительно быстрым является расчет методом сил. Его модификация позволяет также оценить вклад в НДС сил трения скольжения. Кроме того, высокая производительность метода сил позволяет за короткое время решать контактную задачу для поглощающего аппарата многократно, что может найти применение в решении задачи износа конструкции.

Применительно к контактной задаче основная идея метода сил заключается в следующем. В качестве основных неизвестных принимаются усилия в контактных элементах (знание этих усилий позволяет перейти в дальнейшем к контактным давлениям). Пары точек на поверхности тел, которые могут войти в контакт, отмечаются заранее. Предполагается, что точки одной контактной пары расположены в непосредственной близости одна от другой, что делает возможным построение общей нормали и касательной к обеим поверхностям.

Для отыскания неизвестных должна быть сформирована матрица коэффициентов канонических уравнений метода сил. Для определения коэффициентов этой матрицы необходимо к каждой паре узлов области приложить единичные усилия по нормали к поверхности и определить перемещения по нормали во всех контактных узлах. Расчет перемещений выполняется методом конечных элементов (МКЭ). Однако для использования МКЭ необходимо, чтобы все тела рассчитываемой системы были кинематически неподвижны. В задачах с многослойным контактом некоторые тела внешних связей не имеют (пример – подвижная пластина, клин и т. д.) При выполнении расчета к таким телам дополнительно вводятся связи, обеспечивающие кинематическую неизменяемость. Поскольку в реальности таких связей нет, дополнительными неизвестными становятся перемещения тел как твердых по направлениям введенных связей. Для определения таких перемещений используются уравнения равновесия для каждого тела.

В соответствии с этим структура разрешающей системы включает в себя уравнения метода сил, записанные для контактных пар узлов (отсутствие взаимного внедрения тел), а также уравнения равновесия статики, записанные для тел, которые имеют одну или несколько степеней свободы.

Поскольку размер контакта заранее неизвестен, то для определения пар узлов, находящихся в контакте, требуется итерационная процедура.

Каждая итерация включает в себя три этапа. На первом этапе решается система уравнений. После этого, на втором этапе, для всех найденных X_n проверяется условие, которое состоит в том, что контактная сила не может быть отрицательной. Если данное условие для *i*-того уравнения не выполняется, то считается, что *i*-тая пара узлов не находится в контакте, и *i*-тое уравнение удаляется из системы, а X_i принимается равным нулю. На третьем этапе проверяется наличие зазоров в парах узлов, которые не находятся в контакте. Если зазор отсутствует, пара вводится в контакт (в систему возвращается соответствующее уравнение). Для определения зазора в *i*-той контактной паре необходимо значения $X_1, ..., X_n$ подставить в уравнение зазора для *i*-того контакта.

Итерационный алгоритм завершается, если на данной итерации все контактные силы неотрицательны и все зазоры в неконтактирующих парах также неотрицательны.

В качестве тестового примера была решена задача Герца о внедрении сферы в полупространство [4]. Для проверки сходимости решения при контакте более двух тел расчетная схема была дополнена еще одним полупространством.

Распределение давлений в области контакта и распределение напряжений в упругих телах представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Распределение давлений и эквивалентных напряжений в области контакта, МПа

Расхождение с аналитическим решением по максимальным напряжениям составило 2,4 %, по радиусу пятна контакта – 0,4 %.

При работе аппарата детали значительно перемещаются, поэтому расчет необходимо выполнять для различных положений. Лучшие результаты расчета достигаются при условии близкого расположения контактных узлов. В расчетной схеме близость контактирующих точек обеспечивается тем, что конечно-элементная модель аппарата является параметризованной. В зависимости от входного параметра – хода аппарата, конечно-элементная сетка перестраивается автоматически (рисунок 4). При этом для любого хода аппарата выполняется соответствие узлов контактной пары друг другу.



Рисунок 4 – Конечно-элементная модель ПМКП-110 при минимальном и максимальном ходах аппарата

Если взаимодействующие тела движутся, и направление движения известно, то при решении контактной задачи методом сил могут быть учтены силы трения. Для этого при формировании матрицы канонических уравнений метода сил помимо единичных усилий в направлении нормали прикладываются и касательные силы, величина которых соответствует расчетному коэффициенту трения, а направление – заданному направлению движения.

Распределение контактных давлений и напряжений в конструкции представлено на рисунке 5.



Рисунок 5 – Распределение напряжений и контактных давлений на поверхности подвижной пластины и корпуса (ход 100 мм), МПа

Рисунок 6 – Контакт корпуса и подвижной пластины. Масштаб деформаций 7:1

Достоинством метода сил является возможность разделения решения задачи на два этапа – формирование системы канонических уравнений, что по сути является решением задачи статики от многих нагрузок для данной системы тел (около 25 минут) и последующее определение контактных давлений (несколько секунд). Это позволяет использовать данный алгоритм для процессов изнашивания, что в свою очередь позволяет определить перераспределение контактных давлений по мере износа.

Значительные деформации корпуса вызваны его высокой податливостью. В сочетании с высокой жесткостью деталей клиновой системы контакт подвижной пластины со стенкой корпуса происходит по двум линиям, при этом наблюдаются высокие напряжения в подвижной пластине. В отдельных точках корпуса и подвижной пластины напряжения достигают (а иногда и превышают) предел текучести, что ставит задачу учета пластических деформаций при решении контактной задачи.

Уровень контактных давлений очень высокий. С учетом взаимной приработки и износа деталей аппарата площадь пятна контакта будет постепенно увеличиваться. Однако визуальная оценка износа при испытаниях показывает, что даже после 300 циклов нагружения с максимальным ходом в центральной части подвижной пластины контакт с корпусом отсутствует.

Пятна контакта на вспомогательных и других рабочих поверхностях имеют большую площадь, что вызвано значительной жесткостью тел клиновой системы. Для снижения контактных давлений можно: уменьшить податливость корпуса путем добавления ребер жесткости; изменить форму пластины в поперечном сечении; изменить форму металлокерамических вставок.

Список литературы

1 Болдырев, А. П. Расчет и проектирование амортизаторов удара подвижного состава / А. П. Болдырев, Б. Г. Кеглин. – М. : Машиностроение, 2004. – 199 с.

2 Ольшевский, А. А. DSMFem: руководство пользователя [Электронный ресурс] / А. А. Ольшевский, К. В. Шевченко. – Электрон. дан. – Загл. с экрана.

3 **Сакало, В. И.** Контактные задачи железнодорожного транспорта/ В. И. Сакало, В. С. Косов. – М. : Машиностроение, 2004. – 496 с.

4 Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М. : Мир, 1989. – 510 с.

Получено 04.06.2012

A. A. Olshevsky, M. A. Olshevskaya, A. A. Milto. Stress-strain state analysis of cushion unit PMKP-110.

To solve the problem of contact between several deformable solids, new program module was developed and integrated into DSMFem, the finite element analysis package. The module is based on flexibility method, that allows taking account of sliding friction. Finite element models were built for different loading cases of center coupler cushion unit. Stress-strain states were computed and analyzed. Nonuniformity of contact pressures was subsisted and several ways to solve it were described.