

соответствующих свойств будет одинакова. При описании анизотропии упругих свойств поликристаллических систем с кубической решеткой необходимо располагать значениями трех независимых параметров, характеризующихся текстурой материала.

Решение задачи установления количественной связи между свойствами материала и его текстурой привело к построению области совместного изменения текстурных параметров. Область получена с помощью ограничений, накладываемых внешней симметрией поликристалла и внутренней симметрией монокристалла.

Область совместного изменения текстурных параметров представлена трехмерным телом в координатах, определяемых текстурными параметрами. Каждая точка области соответствует определенному текстурному состоянию анизотропного материала. Точки, лежащие на плоскостях симметрии области, соответствуют тетрагональному материалу. В каждой такой плоскости можно выделить линии, точки которой соответствуют трансверсальной изотропии.

Очевидно, что один и тот же материал в разных его текстурных состояниях будет иметь в общем случае разную анизотропию упругих свойств. Можно проследить за изменением свойств анизотропного материала с учетом изменения его текстуры, выделив в области совместного изменения текстурных параметров, так называемые, траектории текстурных состояний. Свойства меняются, что сопровождается трансформацией указательных поверхностей технических констант. Указательные поверхности (индикатрисы) представляют собой зависимости величин упругих констант от направления, что позволяет получить наглядное представление об анизотропии упругих свойств, а также дают возможность определять ориентировки кристаллов с экстремальными значениями упругих свойств. В основном исследуют модуль нормальной упругости. Но незначительная анизотропия модуля Юнга не может служить основанием для предположения о малой анизотропии и других упругих характеристик. В связи с этим исследована анизотропия коэффициента Пуассона, а также и модуля сдвига. Следует отметить существование научного направления *Orientierungs Stereologie* в исследованиях текстуры металлов, заключающееся в построении индикатрис для сравнения анизотропии свойств различных материалов.

УДК 539.3 629.4

ПРЯМОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОУДАРЕНИЯ ВАГОНОВ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ DSMFEM

А. А. ОЛЬШЕВСКИЙ, М. А. ОЛЬШЕВСКАЯ

Брянский государственный технический университет, Российская Федерация

На конференции 2012 г. мы уже докладывали о наших попытках решить задачу определения напряженно-деформированного состояния вагонов при маневровых соударениях прямым интегрированием уравнений движения конечно-элементных моделей вагонов и груза с учетом нелинейной силовой характеристики аппаратов. Расчетная схема соударения приведена на рисунке 1.

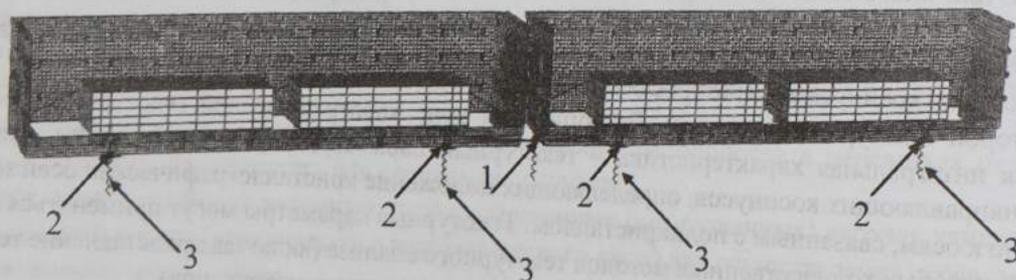


Рисунок 1 – Расчетная схема модели соударения:
1 – сосредоточенная масса автосцепок; 2 – сосредоточенные массы тележек; 3 – упругие элементы тележек

Сама идея разделения упругой системы на несколько отдельных частей и связь из только вычисляемыми в процессе интегрирования силами требует отдельной проверки. Для этого было рассмотрено несколько расчетных моделей разной сложности и, в частности, простейшая 4-массовая модель, состоящая из 4 масс, связанных пружинками (рисунок 2). Ее анализ можно провести решением системы дифференциальных уравнений (выполнено в Маткаде), можно смоделировать МКЭ, заменив пружины стержнями эквивалентной жесткости, а можно разделить систему на две, удалив среднюю пружину и заменив ее действие силами, вычисляемыми в процессе интегрирования. Замена силами, строго говоря, меняет поведение системы, поскольку приложение сил отстает по времени на один шаг интегрирования. Однако, как показали расчеты, при правильном выборе шага все решения практически идентичны.

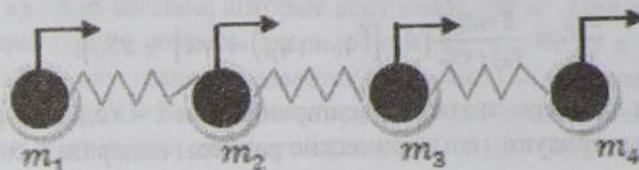


Рисунок 2 – 4-массовая тестовая модель

Выполненные расчеты показали, что такой подход позволяет получить решение для маневровых соударений, но необходимо дорабатывать математические модели аппаратов. Принципиально важно исключить разрывы в силовых характеристиках. Для аппарата типа ПМКП-110 это было сделано за счет учета деформаций корпуса, различных при прямом и обратном ходе. Внимательное рассмотрение процессов, происходящих между деталями аппарата позволило создать безразрывную модель силовой характеристики, при которой процесс смены знака скорости требует конечного перемещения деталей, причем возвратное движение выше некоторого уровня, в пределах которого возникают только упругие деформации без проскальзывания, связано с потерей энергии на трение. Зависимость силы на аппарате от времени при различных начальных скоростях соударения приведена на рисунке 3.

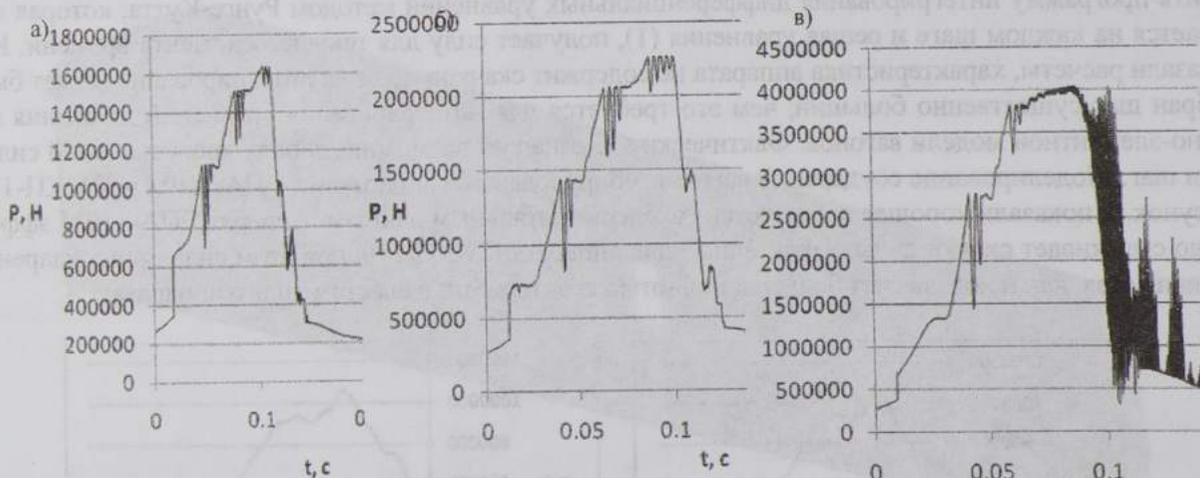


Рисунок 3 – Зависимость силы на аппарате ПМКП-110 от времени при скорости набегающего вагона
а – 2,5 м/с; б – 3,5 м/с; в – 5 м/с

Расчеты показывают хорошее совпадение с экспериментом по максимальным силам и ходу аппаратов при соударении. При закрытии аппарата возникают сильные колебания несущей конструкции, и необходимая степень демпфирования для несущей конструкции вагона требует дальнейшего исследования.

Отдельной проблемой стало введение в модель соударения эластомерного поглощающего аппарата типа ЭПА-110М (рисунок 4). В отличие от аппарата ПМКП-110, его статическая характеристика учитывает только усилия от сжатия эластомера, а динамическая составляющая, которая дает большее значение силы и обусловлена перетеканием эластомера из одной камеры в другую, может быть описана только набором дифференциальных уравнений Навье-Стокса.

Поглощающий аппарат ЭПА-110М состоит из корпуса 1, выполненного заодно с тяговым хомутом автосцепки. В корпусе 1 располагаются поршень 3 с полым штоком и полый плунжер 9, между которыми имеется калиброванный зазор 8 переменной величины, являющийся каналом дросселирования. Полости 2 и 7 внутри плунжера 9, 5 внутри штока поршня 3 и дополнительной камеры днаща 6 заполнены объемно-сжимаемым и текучим телом – эластомерной композицией. Уплотнения 4 обеспечивают герметичность подвижного соединения штока и плунжера. Поведение аппарата описывается уравнениями (1):

$$\left\{ \begin{aligned} P &= \bar{q}_c S_c - \bar{q}_p S_p + \bar{C}_{\text{пол}}(x - 0,1)\sigma_0(x - 0,1) + C_k(x - 0,11)\sigma_0(x - 0,11); \\ \frac{dq_c}{dt} &= \frac{\bar{E} + a\bar{q}_c}{V_{oc} - xS_c} \left[\dot{x}S_c - A \cdot [(q_c - q_p) + \gamma\dot{x}] \right]; \\ \frac{dq_p}{dt} &= \frac{\bar{E} + a\bar{q}_p}{V_{op} + xS_p} \left[A \cdot [(q_c - q_p) + \gamma\dot{x}] - \dot{x}S_p \right]; \end{aligned} \right. \quad (1)$$

В них q_c и q_p – давления в камере сжатия и расширения, x и \dot{x} – ход и скорость сжатия аппарата, остальные переменные характеризуют геометрические размеры аппарата и свойства эластомера.

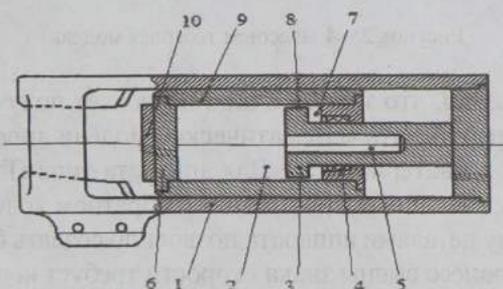


Рисунок 4 – Схема поглощающего аппарата ЭПА-110М

Для учета такой модели в программу интегрирования уравнений метода Ньюмарка пришлось добавить программу интегрирования дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты, которая вызывается на каждом шаге и решая уравнения (1), получает силу для текущего момента времени. Как показали расчеты, характеристика аппарата не содержит скачков и для ее интегрирования может быть выбран шаг существенно больший, чем это требуется для интегрирования уравнений движения конечно-элементной модели вагонов. Фактически это означает возможность получения значений сил за один шаг. Моделирование соударений вагонов, оборудованных аппаратами ЭПА-110М и ПМКП-110, (рисунок 5) показали хорошее соответствие экспериментальным данным. Аппарат ЭПА-110М эффективно сглаживает скачки силы, характерные для аппарата ПМКП-110, при этом сила при соударении уменьшается, как и ход, за счет большей полноты характеристики эластомерного аппарата.

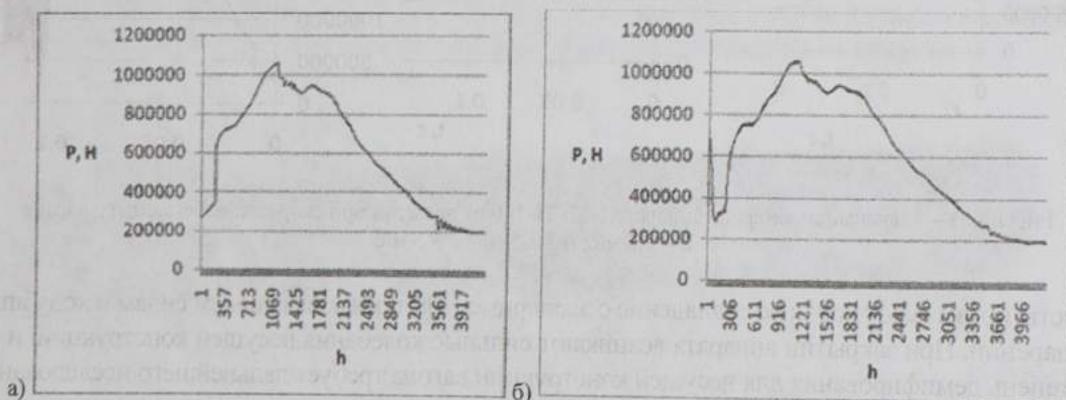


Рисунок 5 – Зависимость силы на аппарате от времени: а – ПМКП-110; б – ЭПА-110М

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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