

УДК 625.23:62-758.2

*Георгий Богомаз
Михаил Кельрих
Марина Соболевская
Иван Хрущ
Дмитрий Горобец*

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕРТВЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ, ПРИ СВЕРХНОРМАТИВНЫХ СЖИМАЮЩИХ НАГРУЗКАХ

Для защиты железнодорожных экипажей от аварийных ударных воздействий предлагается использовать специальные жертвенные элементы, в результате разрушения которых обеспечивается поглощение кинетической энергии удара. Приведены разработанные конечно-элементные математические модели и результаты исследований характера деформирования жертвенных элементов коробчатого типа при сверхнормативных нагрузках с учетом влияния дополнительных устройств, предназначенных для организации управляемого процесса складкообразования и повышения уровня энергопоглощения.

Основным средством обеспечения высокого уровня безопасности движения на железной дороге и предотвращения аварийных столкновений поездов или наездов их на препятствия является использование активных средств защиты. Однако поскольку исключить возможность возникновения аварий практически невозможно, особое внимание во многих развитых странах мира уделяется разработке и созданию пассивных средств защиты, основной задачей которых является поглощение кинетической энергии аварийного удара за счет целенаправленного пластического деформирования так называемых жертвенных элементов, т. е. устройств, рассчитанных на разрушение при заданной сверхнормативной нагрузке. В результате математического моделирования динамических процессов соударения пассажирского поезда с преградой [1] установлено, что конструкция жертвенного элемента должна быть в состоянии воспринять нагрузку порядка 500 кН и распределить ее на несущие элементы вагона. При более высоких нагрузках жертвенные элементы должны терять устойчивость и пластически деформироваться до полного их сплющивания (примерно на 75 % исходного размера). Использование таких жертвенных элементов позволит понизить уровень ускорений, действующих на пассажиров поезда, до допустимого уровня 3g при столкновении поезда с преградой массой 100 т со скоростями до 35 км/ч [2].

Как показал анализ известных из мировой практики технических решений по защите железнодорожных экипажей в аварийных ситуациях, для отечественных пассажирских

© Богомаз Г.И., Кельрих М.Б., Соболевская М.Б., Хрущ И.К., Горобец Д.В., 2007

вагонов, которые до сих пор не оборудуются средствами защиты от аварийных ударов, представляется целесообразным использование жертвенных элементов коробчатого типа, устанавливаемых на раме вагона последовательно с буферами. В данной статье рассмотрены жертвенные конструкции в виде усеченной пирамиды с дополнительными конструктивными элементами (внутренние диафрагмы, внешние пластинки, конструкционный изгиб), предназначенными для создания управляемого процесса образования складок при аварийных продольных воздействиях.

Математическое моделирование деформирования жертвенных элементов при сверхнормативных нагрузках

Для исследования характера деформирования и потери устойчивости жертвенных элементов при сверхнормативных сжимающих нагрузках разработаны математические модели с использованием метода конечных элементов в форме метода перемещений и реализующего его стандартного пакета прикладных программ.

При построении конечно-элементных моделей деформирования жертвенных конструкций использованы четырехузловые оболочечные конечные элементы, которые имеют шесть степеней свободы в каждом узле, а также допускают возможность нелинейного искривления формы. Выбранные элементы позволяют учитывать упругопластические деформации, большие линейные и угловые перемещения, возникающие при сверхнормативных нагрузках.

Определение критической нагрузки потери устойчивости жертвенного элемента до появления пластических деформаций основано на решении проблемы собственных значений, сведенной к решению характеристического уравнения [3]:

$$(K - \beta_i K_g)w_i = 0,$$

где K , K_g – матрицы жесткости конструкции и геометрической жесткости; β_i – собственное значение (параметр нагрузки); w_i – соответствующий параметру нагрузки собственный вектор перемещений.

Найденные из решения характеристического уравнения значения параметров нагрузки β_i представляют собой коэффициенты запаса устойчивости и показывают, во сколько раз критическая нагрузка, при которой происходит потеря устойчивости исходной формы равновесия модели конструкции, больше приложенной нагрузки F . Практический интерес представляет определение значения первой, наименьшей критической нагрузки потери устойчивости $F_{1кр} = \beta_1 F$.

Построены конечно-элементные схемы жертвенных конструкций разных моделей: в виде усеченной пирамиды без диафрагм (модель 1 на рис. 1, а), с одной внутренней диафрагмой (модель 2 на рис. 1, б) или с двумя (модель 3 на рис. 1, в). Рассмотрена возможность замены внутренних диафрагм внешними пластинками. Разработаны конечно-элементные схемы жертвенных конструкций с широкими (модель 4 на рис. 1, г)

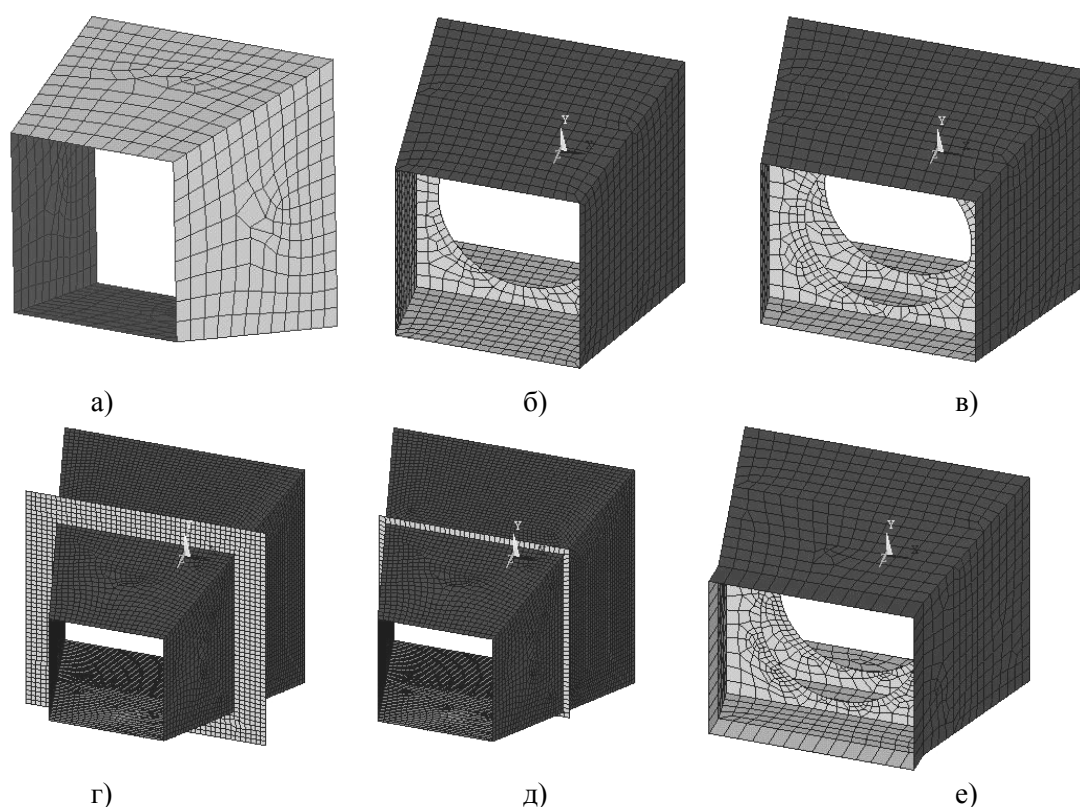


Рис. 1. Конечно-элементные схемы жертвенных элементов

или узкими (модель 5 на рис. 1, д) внешними пластинками, приваренными по периметру поперечного сечения конструкции. Построены конечно-элементные схемы жертвенного элемента в виде усеченной пирамиды с двумя внутренними диафрагмами и дополнительным конструкционным изгибом (модель 6 на рис. 1, е).

В качестве граничных условий заданы условия жесткой заделки по периметру большего основания жертвенного элемента, а также условия подвижной заделки на меньшем основании в направлении приложенной по его периметру распределенной сжимающей нагрузки.

Для анализа характера деформирования жертвенных элементов рассмотрены конструкции в виде стальной усеченной пирамиды с квадратным поперечным сечением и такими геометрическими параметрами:

- вариант 1: высота – 360 мм, длина стороны нижнего основания – 400 мм, верхнего – 300 мм, толщина боковых стенок – 3 мм, основания – 4 мм;
- вариант 2: высота – 470 мм, длина стороны нижнего основания – 480 мм, верхнего – 230 мм, толщина боковых стенок – 1 мм, основания – 2 мм.

Для подтверждения адекватности разработанных математических моделей проведено сопоставление результатов расчетов с данными экспериментов, проведенных в лаборатории механических испытаний отдела динамики, прочности и технологии изготовления конструкций ИТМ НАНУ и НКАУ. Получено хорошее (с точностью до 2%) согласование расчетного и экспериментально установленного значения критической на-

грузки (460 кН) потери устойчивости при сжатии жертвенной конструкции без диафрагм (модель 1 на рис. 1, а) с параметрами, соответствующими варианту 1.

Результаты расчетов

Исследовано влияние геометрических параметров (высоты, толщины стенок, размеров поперечных сечений усеченной пирамиды), количества диафрагм, их толщины и места расположения на характер деформирования жертвенных элементов и критический уровень нагрузок, при которых происходит потеря их устойчивости или пластическое деформирование. Результаты расчетов устойчивости жертвенных элементов с одной (модель 2 на рис. 1, б) или двумя внутренними (модель 3 на рис. 1, в) диафрагмами приведены на рис. 2.

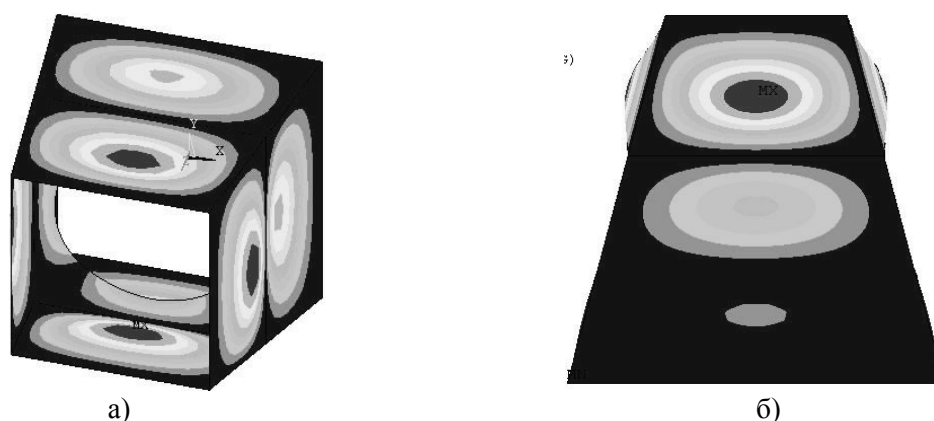


Рис. 2. Формы потери устойчивости при осевом сжатии для жертвенного элемента: а) с одной внутренней диафрагмой; б) с двумя внутренними диафрагмами

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) и устойчивости рассмотренных жертвенных элементов показал, что их несущая способность определяется критическими нагрузками потери устойчивости исходной формы равновесия, т.е. напряжения в момент потери устойчивости меньше предела текучести материала. Показано, что при деформировании жертвенного элемента (модель 2, геометрические параметры соответствуют варианту 1) с центральной внутренней диафрагмой толщиной 4 мм образуются две складки, а значение критической нагрузки, при которой происходит потеря его устойчивости, в 1,3 раза выше, чем у аналогичного жертвенного элемента без диафрагм. Как видно из рис. 2, а, деформации на боковых пластинах, прилегающих к меньшему основанию, имеют более интенсивный характер. Это означает, что складкообразование будет протекать поэтапно, начиная с области, прилегающей к меньшему основанию жертвенного элемента. Как показали расчеты, установка второй диафрагмы между центральной диафрагмой и большим основанием пирамиды привела к увеличению интенсивности деформаций в области меньшего и уменьшению в области большего оснований. При этом критическая нагрузка потери устойчивости увеличилась более чем в 2 раза по сравнению со значением критической нагрузки для соответствующей модели без диафрагм.

Для жертвенной конструкции без диафрагм (модель 1 на рис. 1, а) с геометрическими размерами, соответствующими варианту 2, получено, что она теряет устойчивость при сжатии силой 11 кН. Аналогичная конструкция с одной диафрагмой толщиной 1 мм посередине (модель 2) также деформируется последовательно, начиная с области прилегающей к меньшему основанию. Критическая нагрузка потери устойчивости для нее составляет 16 кН. В случае, когда две внутренние диафрагмы установлены таким образом, что делят высоту усеченной пирамиды на три одинаковых по длине участка, то вначале (при нагрузке 24,1 кН) теряет устойчивость средняя часть конструкции. Если же одна диафрагма установлена на высоте 140 мм, а вторая – на высоте 290 мм от большего основания, то характер складкообразования идет поэтапно, начиная с области, прилегающей к меньшему основанию жертвенного элемента (рис. 2, б). Критическая нагрузка потери устойчивости для нее составляет 23,9 кН. При уменьшении толщины усеченной пирамиды до 0,85 мм характер ее деформирования не меняется, а критическая нагрузка потери устойчивости составляет примерно 14 кН.

Таким образом, установка дополнительных внутренних диафрагм позволяет управлять складкообразованием в процессе деформирования жертвенного элемента и его энергоемкостью, однако сопровождается ростом значений критических нагрузок, вызывающих потерю устойчивости конструкции.

Характер потери устойчивости жертвенной конструкции толщиной 1 мм, когда вместо внутренних диафрагм использованы внешние широкие (62,5 мм) или узкие (12,5 мм) пластинки, устанавливаемые по периметру поперечного сечения жертвенного элемента, показан на рис. 3.

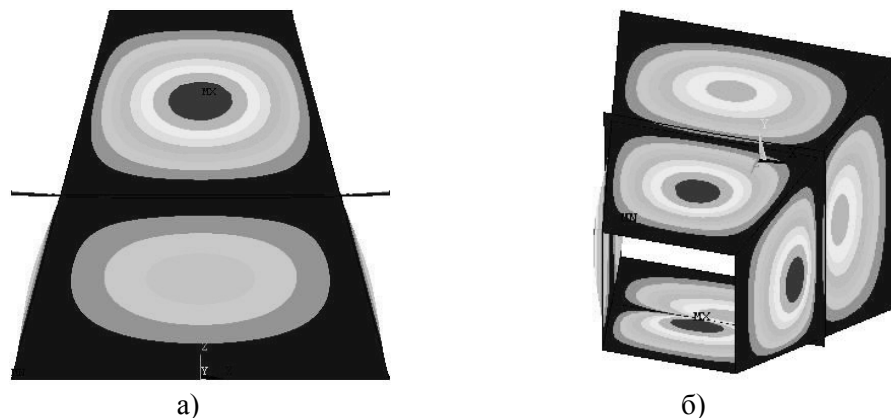


Рис. 3. Формы потери устойчивости при осевом сжатии для жертвенного элемента: а) с широкими внешними пластинками; б) с узкими внешними пластинками

Установлено, что при использовании рассмотренных широких пластинок толщиной 1 мм критическая нагрузка составляет 13,9 кН, при толщине 2 мм – 16,2 кН, при толщине 3 мм – 18,1 кН. При ширине пластинки 12,5 мм и толщине 1 мм критическая нагрузка составляет 13,5 кН. Если такие же пластинки установлены на усеченную пирамиду с толщиной стенки 0,85 мм, то уровень критической нагрузки, естественно, ниже и составляет 9,2 кН.

В целом, согласно рис. 3, в качестве дополнительных конструктивных элементов для организации целенаправленного процесса образования складок вместо внутренних диафрагм могут быть использованы внешние пластинки. Для организации управляемого процесса складкообразования не имеет существенного значения толщина и ширина рассматриваемых пластинок, а важным является место их установки. Установка внешних пластинок, так же, как и внутренних диафрагм, сопровождается ростом значений критических нагрузок, вызывающих потерю устойчивости конструкции. При этом отмечена прямая зависимость уровня критических нагрузок от толщины и ширины внешних пластинок.

С учетом того, что при организации управляемого процесса складкообразования жертвенных элементов с использованием внутренних диафрагм или внешних пластинок наблюдается рост значений критических нагрузок потери устойчивости, рассмотрен жертвенный элемент в виде усеченной пирамиды с двумя диафрагмами и дополнительным конструктивным изгибом (модель б на рис. 1, е). Такой конструктивный изгиб (на расстоянии $10\div 60$ мм от меньшего основания) может способствовать целенаправленному образованию складок и существенному понижению уровня критической нагрузки, при которой начинает терять устойчивость и пластически деформироваться жертвенный элемент. Анализ НДС и устойчивости рассматриваемых элементов показал, что их несущая способность определяется напряжениями, возникающими в области дополнительного изгиба и превышающими предел текучести материала конструкции. При сжатии в этой зоне образуется первая складка (рис. 4).

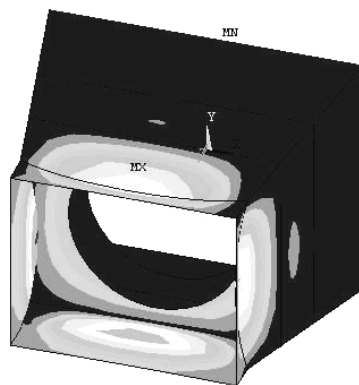


Рис. 4. Деформированное состояние жертвенного элемента с двумя диафрагмами и дополнительным конструктивным изгибом при сжатии

Установлено, что расстояние от меньшего основания жертвенного элемента до конструктивного изгиба и уровень критической нагрузки, при которой образуются остаточные деформации в указанной зоне, имеют обратную зависимость.

Выводы

Разработаны конечно-элементные модели для анализа напряженно-деформированного состояния и потери устойчивости жертвенных элементов для защиты железнодорожных экипажей при сверхнормативных сжимающих нагрузках. Рассмотрены жертвенные элементы в виде усеченной пирамиды с разными вариантами устройств, предназначенных для создания управляемого процесса образования складок при деформировании жертвенных конструкций с целью повышения их энергопоглощения.

Проведен анализ влияния геометрических параметров рассмотренных жертвенных конструкций, количества диафрагм, их толщины и места расположения на критический уровень сжимающих нагрузок, при которых начинается потеря устойчивости жертвенных элементов.

Показана возможность замены внутренних диафрагм внешними пластинками и установлено, что для организации управляемого процесса образования складок не имеет существенного значения толщина и ширина рассматриваемых пластинок, а важным является место их установки. Отмечено, что использование внешних пластинок, так же, как и внутренних диафрагм, сопровождается ростом значений критических нагрузок, вызывающих потерю устойчивости жертвенной конструкции. При этом установлена прямая зависимость уровня критических нагрузок от толщины и ширины внешних пластинок.

Показано, что конструкционный изгиб способствует образованию первой складки, в результате чего существенно понижается уровень критической нагрузки, при которой начинает пластически деформироваться жертвенный элемент. Установлено, что расстояние от меньшего основания жертвенного элемента до конструкционного изгиба и уровень критической нагрузки, при которой образуются остаточные деформации в указанной зоне, имеют обратную зависимость.

Результаты выполненных исследований использованы при выборе конструкции и параметров жертвенного элемента для защиты пассажирского вагона с учетом ограничений, связанных с его габаритами и допустимыми размерами межвагонного пространства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Науменко Н.Е., Хижа И.Ю., Богомаз Е.Г. Исследование эффективности использования защитных устройств, предназначенных для вагонов и локомотивов скоростных пассажирских поездов, в аварийных ситуациях // *Техническая механика*. – 2005. – № 1. – С. 144-150.
2. Науменко Н.Е., Хижа И.Ю., Богомаз Е.Г., Горобец Д.В. Оценка эффективности использования элементов защиты конструкций локомотивов и вагонов пассажирских поездов при аварийных соударениях // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. – Дніпропетровськ, 2005. – Випуск 8. – С. 79-85.
3. Зенкевич О. *Метод конечных элементов в технике*. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

Поступила 7 июля 2007 г.