

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИХ СВОЙСТВ ТРУБЧАТЫХ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ СЖАТИИ

Статья посвящена экспериментальному исследованию характера деформирования энергопоглощающих элементов в виде перфорированных трубчатых образцов при испытаниях их на сжатие, определению максимальных остаточных деформаций и оценке энергоемкости этих элементов.

Статтю присвячено експериментальному дослідженню характеру деформування енергопоглинаючих елементів у вигляді перфорованих трубчатих зразків при випробуваннях їх на стиск, визначенню максимальних залишкових деформацій та оцінці енергоємності цих елементів.

The paper deals with an experiment on deformation of energy-absorbing elements in the form of perforated tubular samples in compression tests, determination of maximal residual deformations and estimation of the power-intensity of these elements.

Анализ существующих технических решений по защите скоростного и высокоскоростного пассажирского поезда при аварийных столкновениях показал, что обеспечение пассивной безопасности железнодорожного экипажа предполагает создание в концевых частях его конструкции интегрируемых в каркас кузова специальных жертвенных зон и энергопоглощающих элементов, которые при сверхнормативных ударных воздействиях должны разрушаться в первую очередь [1 – 8].

Примером успешного решения проблемы пассивной защиты пассажирского вагона может служить разработка [8] бюро научных исследований Федеральной администрации железной дороги США. На основе результатов научных исследований, конечно-элементных расчетов и ряда испытаний, выполненных в рамках проекта State-Of-the-Art (SOA), создана новая конструкция пассажирского вагона с жертвенной зоной. На рис. 1 показана концевая часть конструкции вагона в разрезе центральной продольно-вертикальной плоскостью.

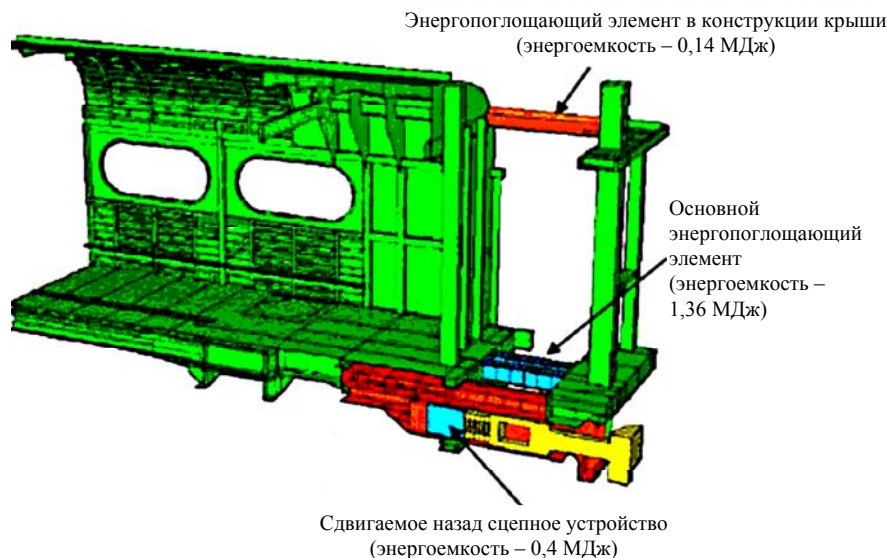


Рис. 1

© В.С. Гудрамович, М.Б. Соболевская, С.А. Сирота,  
И.К. Хрущ, Д.В. Горобец, Ю.А. Клык, 2010

Ферменная конструкция жертвенной зоны в качестве деформируемых элементов может включать перфорированные трубчатые элементы. Для анализа характера их деформирования и оценки их энергопоглощающих свойств проведены экспериментальные исследования на статическое сжатие ряда образцов, изготовленных из малоуглеродистой стали в виде коротких труб прямоугольного поперечного сечения с дополнительными конструкционными вырезами на стенках. В результате выполненных экспериментальных исследований проведен анализ особенностей упругопластического деформирования и разрушения образцов при сжатии, дана оценка уровня поглощаемой при этом энергии, определены уровни нагрузок, при которых начинается пластическое деформирование ( $F_p$ ) и потеря устойчивости ( $F_y$ ) образцов, построены их экспериментальные диаграммы деформирования.

В соответствии с разработанной программой и методикой исследовательских испытаний проведены экспериментальные исследования на сжатие следующих разработанных опытных образцов в виде коротких труб постоянной толщины с различными вариантами перфорации их стенок:

- без перфорации (образец № 1);
- однократная перфорация на меньших гранях (образец № 2);
- однократная перфорация на всех гранях (образец № 3);
- двукратная перфорация на меньших гранях (образец № 4);
- двукратная перфорация на всех гранях (образец № 5).

Испытания на сжатие рассматриваемых образцов проведено на 125-тонном прессе механическом в лаборатории статических испытаний отдела прочности, динамики и технологии изготовления конструкций Института технической механики НАН Украины и НКА Украины.

Ниже приведены результаты выполненных испытаний на сжатие рассмотренных экспериментальных образцов.

Образец № 1 выбран в виде стальной цельной трубы длиной 100 мм с толщиной стенки 4 мм и прямоугольным поперечным сечением 60×40 мм. На рис. 2 приведены отдельные характерные формы при деформации образца, а на рис. 3 – экспериментальная диаграмма деформирования образца № 1 при сжатии. Для данного образца установлено, что его пластическое деформирование начинается при значении сжимающей нагрузки  $F_p = 200$  кН, а при значении силы  $F_y = 415$  кН происходит локальная потеря устойчивости нижней половины трубчатого образца (рис. 3) с образованием одной волны со стороны нижней подвижной опоры пресса (рис. 2, б). Деформирование рассматриваемого образца (рис. 2, в) происходит симметрично относительно его центральных продольных плоскостей с выпучиванием больших боковых граней наружу, а меньших – внутрь. Как видно из рис. 3, в результате потери устойчивости нижней половины образца при сжатии его на 27 мм, нагрузка падает практически по линейному закону до 140 кН, а затем вновь растет до уровня 400 кН при сжатии образца примерно на 51 % (51 мм) от исходной длины. Далее в процессе деформации происходит потеря устойчивости верхней половины образца также с образованием одной волны, однако в отличие от потери устойчивости нижней половины образца, выпучивание его больших боковых граней идет вовнутрь, а меньших – наружу. На рис. 2, г показано деформированное состояние образца до потери устойчивости верхней его половины, а на рис. 2, д – после нее. В результате потери устойчивости нижней половины образца нагрузка падает и при сжатии его на 66 мм достигает

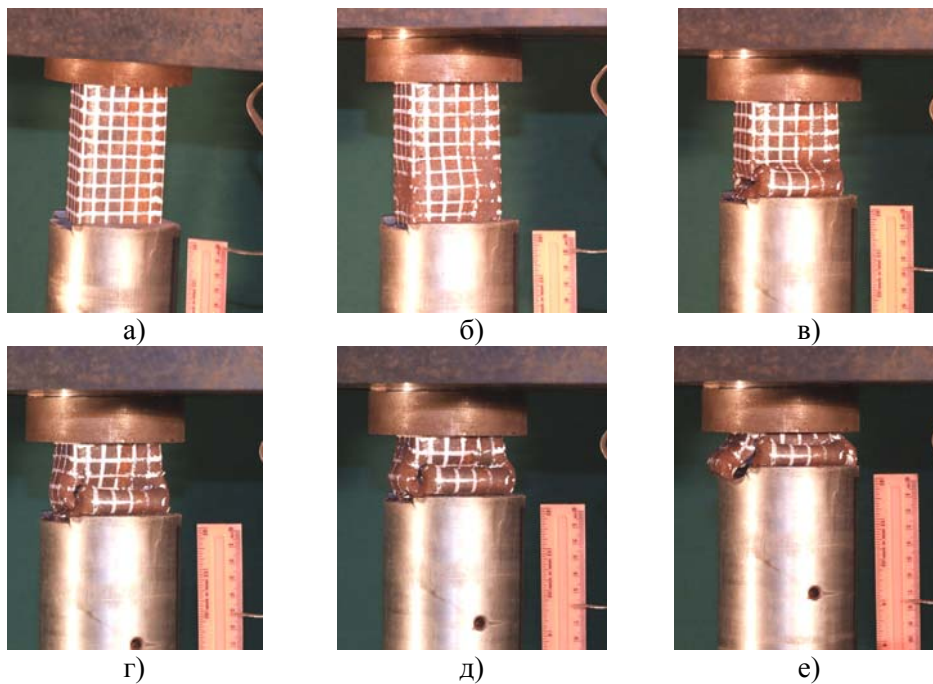


Рис. 2

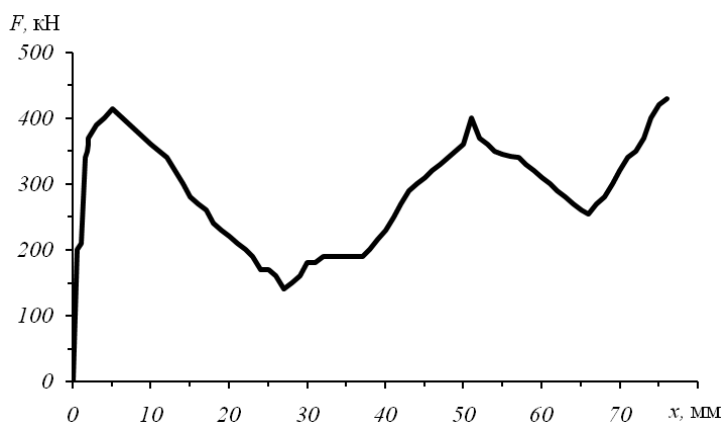


Рис. 3

уровня 255 кН. На этом этапе наблюдаются разрывы в материале образца по угловым соединениям его граней. Дальнейшее сжатие экспериментального образца приводит к резкому возрастанию нагрузки и полному его сплющиванию (рис. 2, е).

Эксперимент был остановлен при сжатии образца на 76 %. Сжимающая нагрузка при этом достигла значения  $F_c = 430$  кН. Установленный в результате проведенного эксперимента уровень энергопоглощения при сжатии данного образца составил 21 кДж.

Образец № 2. Геометрические параметры данного образца соответствовали параметрам предыдущего, но, в отличие от него, он имел центральные сквозные отверстия на меньших гранях с размерами  $4 \times 60$  мм. На рис. 4 приведены характерные деформированные формы образца при испытании на сжатие, а на рис. 5 – полученная экспериментальным путем диаграмма деформирования.

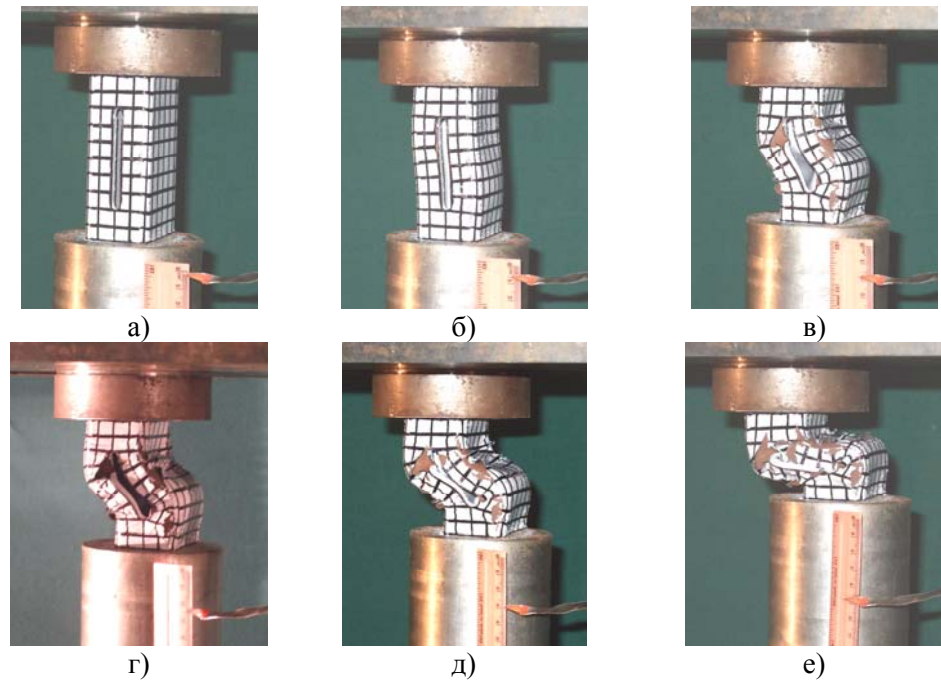


Рис. 4

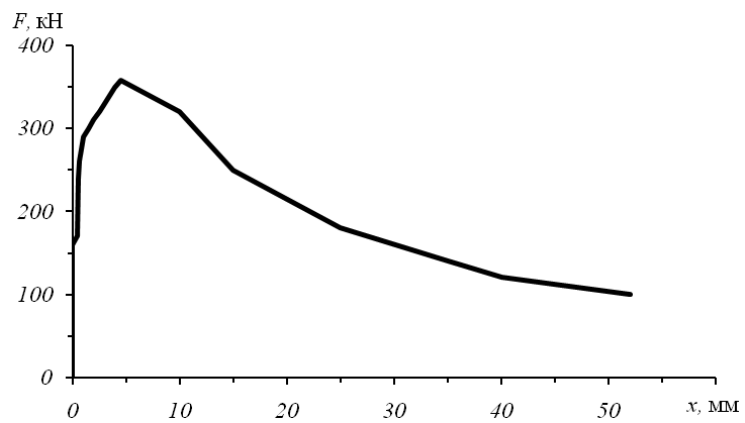


Рис. 5

Пластические деформации появляются в данном образце при сжимающей нагрузке  $F_p = 160$  кН (рис. 5). При значении сжимающей силы  $F_y = 358$  кН происходит общая потеря устойчивости рассматриваемого образца (рис. 4, б) в результате потери устойчивости его больших граней, которые не имеют отверстий. Дальнейшее сжатие образца сопровождается сдвигом его поперечных торцевых сечений в плоскости параллельной меньшим граням, имеющим сквозные отверстия. После потери устойчивости нагрузка падает и при продольном перемещении 52 мм достигает значения  $F_c = 100$  кН (рис. 5). Эксперимент продолжался до полного разрушения образца, уровень энергопоглощения при этом составил порядка 10 кДж.

Образец № 3. Геометрические параметры данного образца соответствовали параметрам предыдущего, но, в отличие от него, он имел, кроме центральных сквозных отверстий на меньших гранях с размерами 4×60 мм, дополнительные отверстия на больших гранях с размерами 24×60 мм. Задание таких параметров отверстий позволяло сделать все сечения боковых ребер образца одинаковыми. На рис. 6 приведены результаты испытаний экспериментального образца модели 3 на сжатие, а построенная на основе экспериментальных данных диаграмма его деформирования приведена на рис. 7.

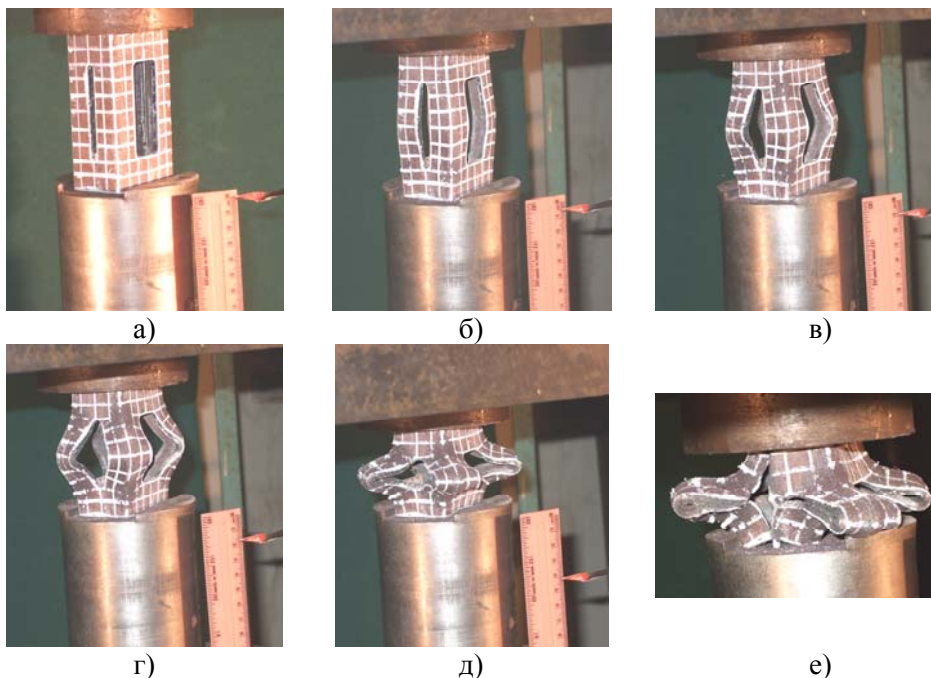


Рис. 6

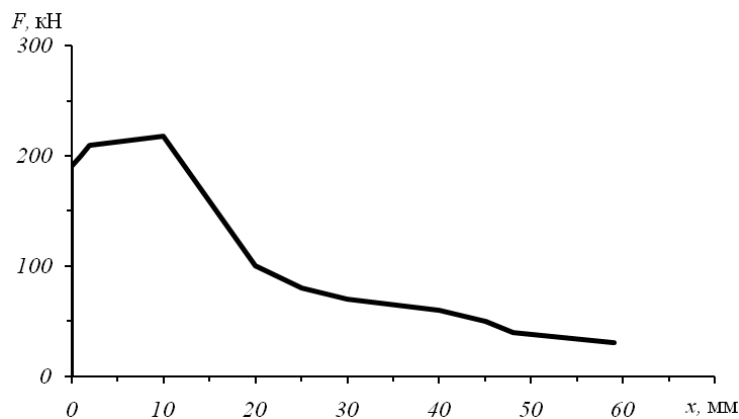


Рис. 7

Установлено, что остаточные деформации в рассматриваемом образце появляются при сжимающей нагрузке  $F_p = 200$  кН. При значении сжимающей си-

лы  $F_y = 218$  кН и продольного перемещения 10 мм происходит общая потеря устойчивости рассматриваемого образца (рис. 6, б), вызванная практически одновременной потерей устойчивости всех боковых ребер образца. Благодаря выбранным размерам отверстий, дальнейшее сжатие экспериментального образца не сопровождалось относительным сдвигом его поперечных торцевых сечений. После потери устойчивости нагрузка падает и при продольном перемещении 59 мм достигает значения  $F_c = 30$  кН (рис. 7). Эксперимент продолжался до полного разрушения образца в результате разрывов на его меньших гранях, как показано на рис. 6, е. Установлено, что уровень энергопоглощения при сжатии образца № 3 составил величину порядка 5,5 кДж.

Образец № 4 был выбран в виде стальной трубы с прямоугольным поперечным сечением 60×40 мм, длиной 180 мм и толщиной стенки 4 мм. Образец имел центральные сквозные отверстия как на меньших гранях (размерами 8×60 мм в верхней половине и 4×60 мм в нижней половине), так и на больших гранях (размерами 28×60 мм в верхней половине, 24×60 мм в нижней части). Параметры отверстий определялись из условия, чтобы все сечения боковых ребер образца были одинаковыми. На рис. 8 приведены характерные формы при сжатии данного образца, а на рис. 9 – диаграмма его деформирования.

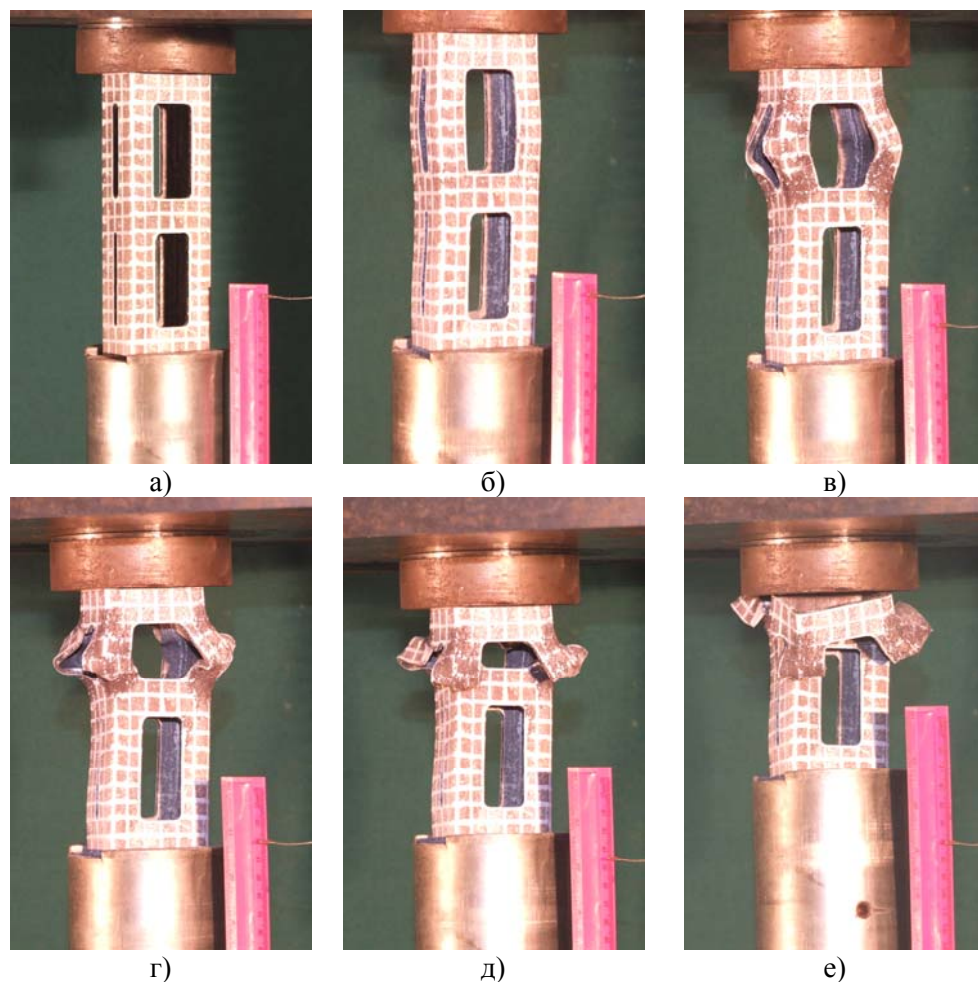


Рис. 8

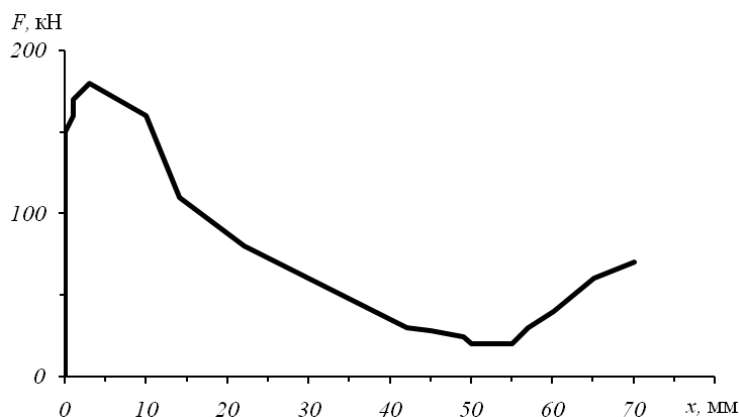


Рис. 9

Как следует из рис. 9, при значениях нагрузки до  $F_p = 150$  кН наблюдаются упругие деформации образца. При значении сжимающей силы  $F_y = 180$  кН и продольного перемещения 3 мм происходит общая потеря устойчивости образца (рис. 8, б), вызванная потерей устойчивости всех боковых ребер верхней половины образца, в которой расположены отверстия большего размера. В отличие от результатов, полученных в предыдущем испытании образца № 3, при деформировании верхней части образца наблюдался сдвиг его торцевых сечений. После локальной потери устойчивости верхней половины образца нагрузка падает и при продольном перемещении 55 мм достигает значения  $F_c = 20$  кН (рис. 9). Дальнейшее сжатие образца сопровождалось ростом нагрузки, однако, при силе сжатия 70 кН и продольном перемещении 70 мм эксперимент был остановлен из-за возникшего перекоса образца (рис. 8, д) и невозможности дальнейшего его продольного осевого сжатия. Полученный в данном эксперименте уровень энергопоглощения при сжатии образца составил 4 кДж.

Образец № 5 был аналогичен описанному выше образцу № 4, но без сквозных отверстий на больших гранях. На рис. 10 показаны отдельные формы деформаций при испытаниях на сжатие образца № 5, а на рис. 11 приведена полученная экспериментальная диаграмма его деформирования.

Получено, что при значениях нагрузки до 150 кН наблюдаются упругие деформации образца (рис. 11). При значении сжимающей силы  $F_y = 295$  кН и продольного перемещения 10 мм происходит общая потеря устойчивости рассматриваемого образца (рис. 10, б), вызванная потерей устойчивости больших граней верхней части трубы, которые не имеют отверстий. После потери устойчивости нагрузка резко падает и при продольном перемещении 15 мм достигает значения  $F_c = 130$  кН (рис. 11). Дальнейшее сжатие экспериментального образца № 5 сопровождается сдвигом его поперечных торцевых сечений в плоскости меньшей грани, имеющей сквозное отверстие. При этом темп снижения нагрузки замедляется. Сжимающая сила опускается до значения  $F_c = 25$  кН при продольном перемещении 45 мм. В отличие от результатов, полученных для образца № 2, при деформировании верхней части образца № 5 наблюдался не только сдвиг его торцевых сечений, но и наклон экспериментального образца в плоскости меньшей боковой грани со сквозным отверстием. Дальнейшее сжатие образца стало невозможным, и эксперимент был остановлен.

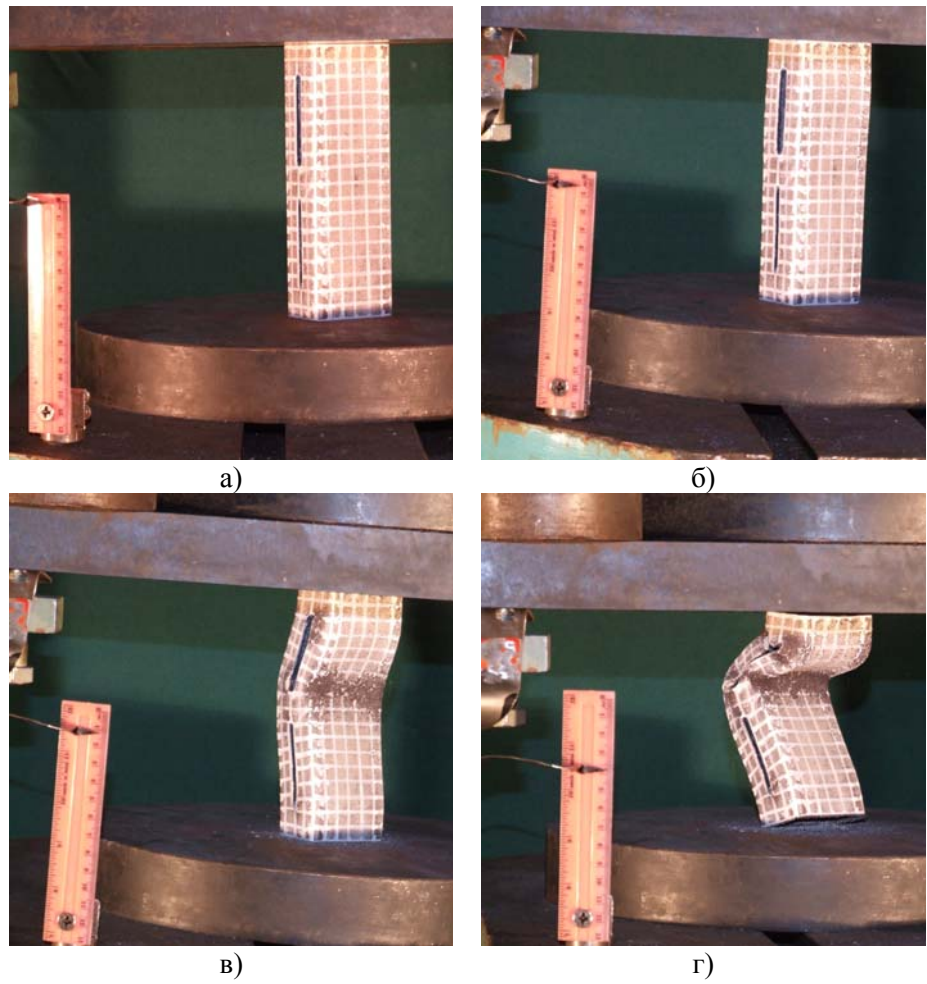


Рис. 10

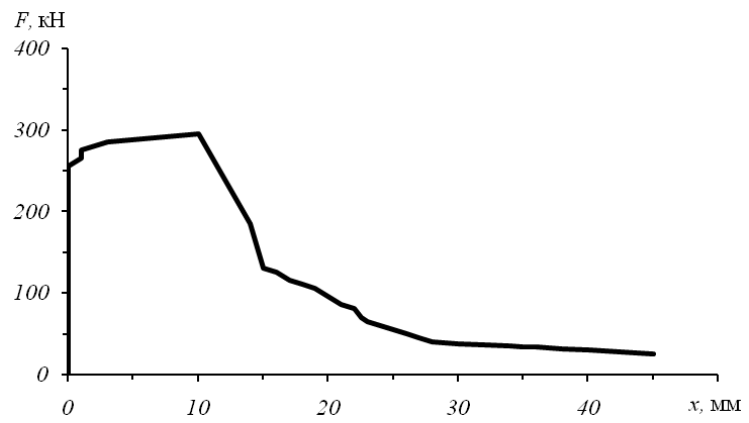


Рис. 11

Уровень энергопоглощения при сжатии данного образца составил 5,5 кДж.



Выполненные экспериментальные исследования перфорированных трубчатых образцов из малоуглеродистой стали на статическое сжатие показали, что после потери несущей способности образцов сжимающая нагрузка снижается в три-четыре раза в результате появления зон пластической деформации на ребрах в местах, ослабленных перфорацией. Значительное влияние на процесс развития пластических деформаций образцов оказывают их длина и условия закрепления.

Отмеченные в результате экспериментальных исследований особенности деформирования трубчатых образцов с различным видом перфорации целесообразно использовать при организации жертвенных зон в конструкции железнодорожного экипажа скоростного пассажирского поезда. В случае аварийного столкновения поезда с препятствием эти перфорированные трубчатые элементы позволяют организовать контролируемый характер разрушения жертвенных зон и заданную схему перераспределения сил на несущие элементы конструкции с целью пассивной защиты пассажиров и поездной бригады от сверхнормативных ударных воздействий.

1. Подвижной состав повышенной безопасности при столкновениях // Железные дороги мира. – 2006. – № 4. – С. 49 – 55.
2. Пассивная безопасность пассажирского подвижного состава // Железные дороги мира. – 2007. – № 6. – С. 61 – 65.
3. Прочность подвижного состава при соударении // Железные дороги мира. – 2000. – № 4. – С. 32 – 36.
4. Аллен Р. Передовые технологии для железнодорожного транспорта / Р. Аллен // Железные дороги мира. – 2004. – № 10. – С. 43 – 44.
5. Беляев В. И. Разработка системы безопасности пассажирского поезда при аварийных соударениях / В. И. Беляев, Ю. М. Черкашин, Д. А. Ступин // Транспорт : збірник наукових праць. – 2000. – Вип. 6. – С. 11 – 13.
6. Kube R. Пассажирские вагоны – стоимость и комфорт / R. Kube // Железные дороги мира. – 2003. – № 4. – С. 27 – 28.
7. Богомаз Г. И. Повышение безопасности пассажирского поезда при аварийных ситуациях / Г. И. Богомаз, А. Д. Лашко, А. Н. Пишнько, О. А. Шкабров, Г. С. Игнатов // Залізничний транспорт України. – 2007. – № 4. – С. 44 – 48.
8. Tyrell D. Overview of a Crash Energy Management Specification for Passenger Rail Equipment / E. Martinez, K. Jacobsen, D. Parent, K. Severson, M. Priante, A. B. Perlman // American Society of Mechanical Engineers. – 2006. – № RC2006-94044. – P. 38 – 48.

Институт технической механики  
НАН Украины и НКА Украины,  
Днепропетровск

Получено 30.04.10,  
в окончательном варианте 17.05.10