

### **ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИЙ СОТОВЫХ ПАКЕТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ УСТРОЙСТВ ПАССИВНОЙ ЗАЩИТЫ**

Исследовано влияние параметров сотовых пакетов, используемых в устройствах пассивной защиты пассажирского подвижного состава в аварийных ситуациях, на величину необратимо поглощаемой ими энергии при действии продольных сжимающих нагрузок. Приведены рекомендации по выбору их параметров.

Проведено дослідження впливу параметрів стільникових пакетів, які використовуються в пристроях пасивного захисту пасажирського рухомого складу в аварійних ситуаціях, на величину незворотно поглиняної енергії при дії повздовжніх стискальних навантажень. Приведені рекомендації по вибору параметрів їх конструкцій.

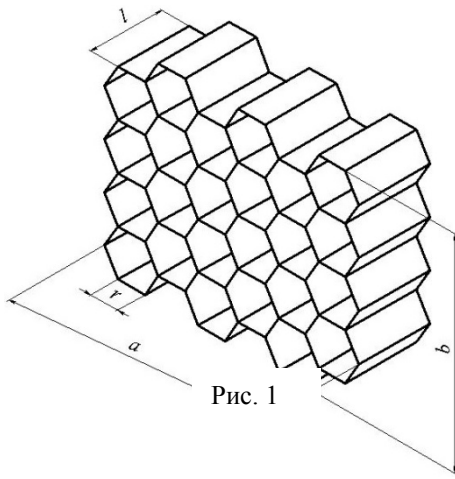
The influence of parameters of cellular packs for devices of the passenger vehicle passive protection in an emergency on the value of an irreversibly absorbed energy by the action of the longitudinal compressive loadings is examined. The recommendations for choosing parameters of the cellular packs are made.

Анализ существующих технических решений по обеспечению безопасности пассажиров при аварийных столкновениях поездов [1 – 3] показал, что повышения безопасности можно добиться за счет использования пассивной защиты, которая заключается в оборудовании торцевых частей конструкций вагонов и локомотивов специальными одноразовыми амортизаторами большой энергоемкости. Установка таких устройств направлена на необратимое поглощение части кинетической энергии соударения [4 – 6], что позволяет снизить перегрузки, действующие на пассажиров [7, 8]. В настоящее время вопросы разработки средств пассивной защиты для пассажирского подвижного состава с ростом скоростей движения приобретают все большее значение и актуальность.

Выбор параметров энергопоглощающих элементов устройств пассивной защиты – сложная многопараметрическая задача, которая решается исходя из требований по энергоемкости и максимально допустимой силе реакции при сжатии этих устройств.

В настоящей работе рассмотрены энергопоглощающие элементы устройств пассивной защиты в виде металлических пакетов сот, поглощение кинетической энергии у которых происходит за счет их упругопластической деформации при нагрузке, приложенной вдоль осей его ячеек. Выбор сотовых пакетов обусловлен их высокими энергопоглощающими свойствами. Показатель эффективности энергопоглощения сотовых пакетов, который определяется долей их энергоемкости от энергоемкости соответствующего идеального амортизатора, может достигать 80%. Кроме этого, сотовые пакеты (рис. 1) дают возможность проектировать устройства пассивной защиты с широким диапазоном энергопоглощения, изменяя площадь и последовательно объединяя их в блоки.

При выборе параметров сотовых пакетов необходимо учесть ряд ограничений, в частности касающихся габаритных размеров, массы, технологического процесса их изготовления, что в конечном итоге определяет их стоимость. Поэтому при проектировании для предварительного выбора параметров сотовых пакетов следует использовать приближенные расчетные формулы определения уровня энергопоглощения, величины силы смятия и удельной энергии деформации металлических конструкционных материалов, из которых могут изготавливаться пакеты сот. © Д.В. Горобец, И.К. Хрущ, Ю.А. Клык, 2011  
Техн. механика. – 2011. – № 3.



Проведем анализ влияния физико-механических свойств материала и геометрических параметров на уровни сжимающей силы и энергии, поглощаемой в результате упругопластической деформации.

Величина энергии, затрачиваемая на разрыв внутренних связей при деформации материала, является характеристикой его энергопоглощающих свойств. Удельная энергия  $U_V$ , затраченная на деформирование единицы объема конструкционного материала

вплоть до разрушения, составляет

$$U_V = \eta \sigma_B \varepsilon_B = \eta \frac{\sigma_B}{\sigma_{\Pi}} \sigma_{\Pi} \varepsilon_B,$$

где  $\sigma_B$  – предел прочности;  $\sigma_{\Pi}$  – предел пропорциональности;  $\varepsilon_B$  – удлинение при разрыве;  $\eta$  – коэффициент полноты диаграммы растяжения, равный отношению ее площади к площади прямоугольника со сторонами  $\sigma_B$  и  $\varepsilon_B$ , значения которого лежат в пределах 0,75 – 0,9.

Выражение для удельной энергии деформирования материала образца можно переписать в виде:

$$U_V = \eta \frac{\sigma_B}{\sigma_{\Pi}} E \varepsilon_{\Pi} \varepsilon_B,$$

где  $E$  – модуль упругости;  $\varepsilon_{\Pi}$  – соответствующее  $\sigma_{\Pi}$  относительное удлинение.

Тогда максимально возможная энергия деформации  $W$  всего объема образца  $V$  будет составлять:

$$W = U_V V = \eta \frac{\sigma_B}{\sigma_{\Pi}} E \varepsilon_{\Pi} \varepsilon_B \frac{m}{\rho} = \eta \frac{\sigma_B}{\sigma_{\Pi}} c^2 \varepsilon_{\Pi} \varepsilon_B m,$$

где  $\rho$  – плотность материала;  $m$  – масса образца;  $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  – скорость распространения упругих волн, которая является постоянной характеристикой материала.

Так как основными параметрами сотового пакета являются его масса и энергоемкость, то выбор материала его конструкции целесообразно выполнять исходя из удельной энергии материала  $U_M$ , затрачиваемой на деформирование единицы массы:

$$U_M = \frac{W}{m} = \eta \frac{\sigma_B}{\sigma_{\Pi}} c^2 \varepsilon_{\Pi} \varepsilon_B.$$

Как видно из приведенной выше формулы, величина удельной энергии  $U_M$  прямо пропорционально зависит от относительного удлинения при разрыве  $\varepsilon_B$ , относительного удлинения  $\varepsilon_{п}$ , соответствующего напряжению  $\sigma_{п}$ , и отношения предела прочности к пределу пропорциональности материала. Значения скоростей распространения упругих волн  $c$  для наиболее широко применяемых в машиностроении конструкционных сталей и сплавов одного порядка (от 4850 до 5150 м/с). Несколько в более широком диапазоне изменяется отношение предела прочности к пределу пропорциональности и относительное удлинение при разрыве.

В таблице приведены основные физико-механические характеристики рассматриваемых материалов [9], а также значения удельной энергии деформации этих материалов в соответствии с диаграммами их статического деформирования, вычисленные по вышеприведенным формулам.

Таблица

Характеристика	Значения механических характеристик сталей и сплавов					
	Ст3сп	08Ю	09Г2С	10Х13Г18Д	12Х18Н10	АМг6
Модуль упругости, ГПа	213	203	210	209	198	71
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Относительное удлинение	0,20	0,40	0,21	0,47	0,40	0,195
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7874	7871	7850	7850	7950	2640
Предел прочности, МПа	380	350	500	640	530	355
Предел текучести, МПа	250	200	350	315	205	190
Удельная энергия деформации, кДж/кг	8,0	14,0	11,4	28,6	18,5	20,1

Геометрические параметры сотового пакета выбираются в соответствии с требуемыми показателями энергоемкости и силы сжатия, для определения которых можно использовать приближенные аналитические зависимости.

Энергия деформации пакета сот  $U_p$  равна:

$$U_p = k_1 P \Delta l = k_1 k_2 P l ,$$

где  $k_1$  – коэффициент, характеризующий эффективность энергопоглощения пакета сот по сравнению с идеальным амортизатором;  $P$  – максимальное значение силы сжатия пакета сот;  $\Delta l$  – максимальная величина деформации пакета сот;  $k_2$  – коэффициент, характеризующий степень обжатия пакета сот;  $l$  – начальная высота пакета сот.

Коэффициент  $k_1$  равен отношению площади под кривой зависимости силы от хода при деформации пакета сот к соответствующей площади идеального амортизатора.

Коэффициент  $k_2$  может быть определен экспериментально следующим образом:

$$k_2 = \frac{l - l_k}{l} = \frac{\Delta l}{l},$$

где  $l_k$  – конечная высота сотового пакета после смятия. Как показывают результаты проведенных экспериментов по статическому сжатию сотовых пакетов, значения коэффициентов  $k_1 \approx 0,5$ ;  $k_2 \approx 0,75 - 0,8$ .

Максимальное значение силы смятия пакета сот можно определить следующим образом:

$$P = 6r\delta n\sigma_{кр} = 1,54 \frac{\delta}{r} S\sigma_{кр}, \quad (1)$$

где  $r$  – длина стороны сотовой ячейки;  $\delta$  – толщина стенки сотовой ячейки;  $n$  – число сот в пакете;  $\sigma_{кр}$  – критическое напряжение потери устойчивости стенок сот;  $S$  – площадь сотового пакета. Тогда энергия деформации сотового пакета будет равна:

$$U_p = k_1 k_2 P l = 1,54 k_1 k_2 \frac{\delta}{r} S l \sigma_{кр}. \quad (2)$$

При выборе геометрических размеров поперечного сечения отдельной сотовой ячейки необходимо, чтобы критическое напряжение, при котором происходит потеря устойчивости ее стенки, было бы не менее предела текучести материала. Критическое напряжение для стенки соты приближенно можно определить, используя выражения для напряжения, при котором происходит потеря устойчивости шарнирно опертой пластинки [10]:

$$\sigma_{кр} = 3,6 E \sqrt{\tau} (\delta / r)^2 \geq \sigma_T, \quad (3)$$

где  $\tau = E_k / E$ ;  $E_k$  – касательный модуль;  $\sigma_T$  – предел текучести.

При кусочно-линейной аппроксимации диаграммы деформирования материала параметр  $\tau$  можно приближенно определить по формуле

$$\tau = \frac{\sigma_B - \sigma_T}{(\varepsilon_B - \varepsilon_T) E}.$$

Величина критического напряжения  $\sigma_{кр}$  потери устойчивости стенки соты должна располагаться между пределом текучести материала и временным сопротивлением на разрыв (ближе к пределу текучести).

Отношение искомой толщины стенки сот к искомому радиусу сотовой ячейки может быть получено из выражения (3) при замене неравенства строгим равенством:

$$\delta / r = \sqrt{\frac{\sigma_T}{3,6 E \sqrt{\tau}}}.$$

Подставляя значение  $\delta / r$  в выражение для силы смятия (1) и энергоемкости пакета сот (2), а также учитывая, что  $\sigma_{кр}$  ранее было принято равным  $\sigma_T$ , получим:

$$P = 1,54 \sqrt{\frac{\sigma_T}{3,6E\sqrt{\tau}}} \sigma_T S ;$$

$$U_p = 1,54 k_1 k_2 \sqrt{\frac{\sigma_T}{3,6E\sqrt{\tau}}} \sigma_T S l .$$

С использованием вышеприведенных соотношений можно предварительно подобрать необходимые параметры сотовых пакетов (материал, размеры сотовых ячеек), исходя из требуемых величин их силы смятия и энергопоглощения.

С учетом конструктивных ограничений и требуемой энергоемкости 0,5 МДж для устройств пассивной защиты [7, 8], которые могут состоять из нескольких пакетов сот (рис. 1), предварительно выбраны следующие значения геометрических параметров:  $a = 270$  мм;  $b = 364$  мм;  $r = 30$  мм;  $l = 80$  мм;  $\delta = 0,5$  мм.

Окончательный выбор геометрических параметров сотовых пакетов осуществлялся по результатам численных экспериментов, полученным при их деформировании в процессе удара. Моделирование процесса упругопластического сжатия энергопоглощающих элементов приведено в статье [11].

Для предварительно выбранных геометрических параметров рассмотрены варианты сотовых пакетов, изготовленных из различных материалов. Во всех случаях получено, что в начале ударного процесса зависимость контактного усилия от величины деформации линейна, что соответствует упругой деформации конструкции. В процессе дальнейшего сжатия происходит потеря устойчивости и развитие пластической деформации.

На рис. 2 приведены значения удельной энергии  $E_u$ , которая затрачивается на упругопластическое деформирование рассматриваемых пакетов сот, изготовленных из различных материалов.

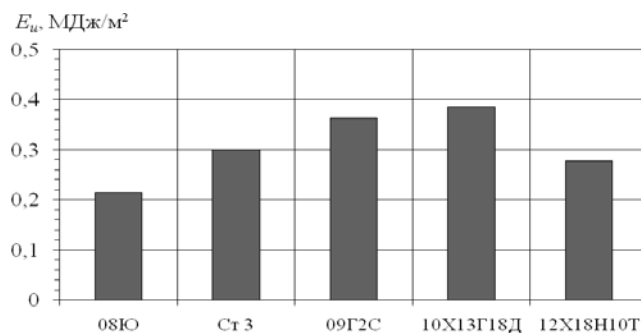


Рис. 2

Удельная энергия  $E_u$  определяется выражением:

$$E_u = \frac{U_p}{S} . \quad (4)$$

На рис. 3 показаны полученные в результате расчетов средние и максимальные значения относительной силы  $P_u$ , при которой происходит потеря устойчивости сотовых пакетов, для разных материалов.

Относительная сила  $P_u$  определялась по формуле:

$$P_u = \frac{P}{S}.$$

Для изготовления пакетов сот, исходя из величины относительной энергии деформации, могут использоваться листовые коррозионностойкие стали марок 10X13Г18Д ( $\varepsilon_B = 47\%$ ) или 12X18Н10 ( $\varepsilon_B = 40\%$ ), которые имеют высокие характеристики энергопоглощения. Однако анализируя данные, приведенные на рис. 2, 3, можно сделать вывод, что сотовый пакет, изготовленный из стали 08Ю, имеет наименьший уровень пиковых и средних значений относительной силы  $P_u$  и соответственно наименьшую величину относительной энергии  $U_u$ .

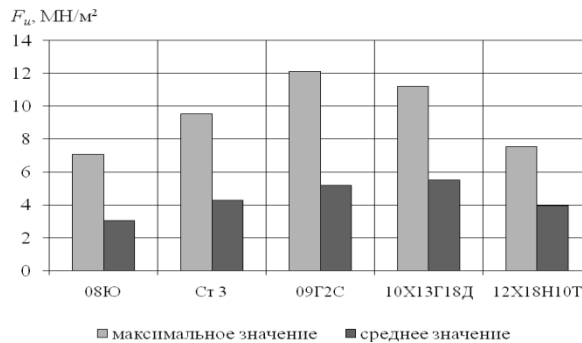


Рис. 3

Выбор материала для пакета сот, в конечном счете, определялся требованием плавности кривой силовой характеристики при сжатии и отсутствия на ней больших пиковых значений, определяющих осевую перегрузку при ударе. Поэтому для изготовления сотового пакета выбрана тонколистовая холоднокатаная малоуглеродистая качественная сталь для холодной штамповки марки 08Ю ( $\varepsilon_B = 34 - 42\%$ ).

Сравнение результатов, полученных путем аналитических вычислений и численных экспериментов, показало, что при ударных нагрузках уровень энергии, поглощаемой в результате деформации сотового пакета, превышает соответствующий уровень при статическом воздействии на (20 – 30) %.

Таким образом, на первом этапе проектирования энергопоглощающего устройства, содержащего сотовые пакеты, для выбора материала и геометрических параметров сот целесообразно использовать приведенные аналитические зависимости. Результаты численного эксперимента ударного нагружения сотовых пакетов показали, что выбранные параметры ячеек могут обеспечить требуемое суммарное значение энергоемкости 0,5 МДж для устройств пассивной защиты, устанавливаемых на торцах пассажирских вагонов.

1. Пассивная безопасность пассажирского подвижного состава // Железные дороги мира. – 2007. - № 6. - С. 61 – 65.
2. Богомаз Г. И. Повышение безопасности пассажирского поезда при аварийных ситуациях / Г. И. Богомаз, А. Д. Лашко, А. Н. Пишынко, О. А. Шкабров и др. // Залізничний Транспорт України. – 2007. – № 4. – С. 44 – 48.
3. Богомаз Г. И. Расчет рам пассажирских вагонов, оборудованных жертвенными элементами, при действии продольных сил / Г. И. Богомаз, Д. В. Горобец, Ю. А. Клык, И. К. Хруц // Проблеми обчислювальної

- механіки і міцності конструкцій : Збірник наукових праць. – Дніпропетровськ : Дніпропетровський національний університет, 2007. – Вип. 11. – С. 15 – 22.
4. *Богомаз Г. И.* Экспериментальная отработка жертвенных элементов для защиты пассажирских вагонов в аварийной ситуации / *Г. И. Богомаз, В. С. Гудрамович, М. Б. Соболевская, С. А. Сирота, И. К. Хруц, Д. В. Горобец, М. Ф. Демешко* // Вісник Дніпропетровського національного університету. Серія : Механіка. – 2007. – Т. 2, Вип. 11. – С. 19 – 28.
  5. *Богомаз Г. И.* Анализ характера деформирования жертвенных элементов, предназначенных для защиты пассажирских вагонов, при сверхнормативных сжимающих нагрузках / *Г. И. Богомаз, М. Б. Кельрих, М. Б. Соболевская, И. К. Хруц, Д. В. Горобец* // Транспортні системи і технології : Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. – 2007. – № 12. – С. 12 – 19.
  6. *Соболевская М. Б.* Оценка энергопоглощающих свойств элементов, предназначенных для пассивной защиты железнодорожных экипажей при аварийных столкновениях с препятствием / *М. Б. Соболевская, И. Б. Телчко, С. А. Сирота, И. К. Хруц, Д. В. Горобец, Ю. А. Клык* // Техническая механика. – 2009. – № 4. – С. 28 – 35.
  7. *Науменко Н. Е.* Исследование эффективности использования защитных устройств, предназначенных для вагонов и локомотивов скоростных пассажирских поездов, в аварийных ситуациях / *Н. Е. Науменко, И. Ю. Хижа, Е. Г. Богомаз* // Техническая механика. – 2005. – № 1. – С. 144 – 150.
  8. *Науменко Н. Е.* Оценка эффективности использования элементов защиты конструкций локомотивов и вагонов пассажирских поездов при аварийных соударениях / *Н. Е. Науменко, И. Ю. Хижа, Е. Г. Богомаз, Д. В. Горобец* // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2005. – Вип. 8. – С. 79 – 85.
  9. *Дегтярев В. П.* Деформации и разрушение высоконапряженных конструкций / *В. П. Дегтярев*. – М. : Машиностроение, 1987. – 105 с.
  10. *Моссаковский В. И.* Прочность ракетных конструкций / *В. И. Моссаковский, А. Г. Макаренков, П. И. Никитин и др.* – М. : Высш. шк., 1990. – 359 с.
  11. *Горобец Д. В.* Исследование процесса упругопластического деформирования перфорированных трубчатых элементов конструкций при сжимающих нагрузках / *Д. В. Горобец, Ю. А. Клык, И. К. Хруц* // Техническая механика. – 2009. – № 3. – С. 44 – 50.

Институт технической механики  
НАН Украины и НКА Украины,  
Днепропетровск

Получено 16.06.11,  
в окончательном варианте 06.09.11