

И. Г. БАРБАС, к.т.н., профессор, ДИИТ (Украина);
С. А. КОСТРИЦА, к.т.н., доцент, ДИИТ (Украина);
В. Н. ДАЦЕНКО, ст.н.с., ДИИТ (Украина);
А. В. СУЛТАН, к.т.н., доцент, ДИИТ (Украина);
Е. М. ДЗИЧКОВСКИЙ, н.с., ДИИТ (Украина);
А. Е. КРИВЧИКОВ, н.с., ДИИТ (Украина)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ И ПРОЧНОСТИ ВАГОНОВ-САМОСВАЛОВ (ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ)

У статті наведений огляд багаторічних досліджень міцності вагонів-самоскидів.

В настоящей статье приведен обзор многолетних исследований прочности вагонов-самосвалов.

A review of long-term research of dump cars strength is given in the article.

Лаборатория динамики и прочности подвижного состава более 50 лет проводит экспериментальные и теоретические исследования прочности новых и модернизированных вагонов-самосвалов (думпкаров) отечественного и зарубежного производства.

Вагоны-самосвалы большой грузоподъемности (105...180 т) обычно используются на горно-обогатительных комбинатах. Анализ повреждаемости таких вагонов показывает, что основная часть повреждений происходит в процессе погрузки, в том случае, когда кузов вагона подвергается ударам глыб большой массы (3 т и более). Этот режим является наиболее тяжелым в работе думпкара. Опыт эксплуатации этих вагонов и специальные эксперименты показывают, что наиболее повреждаемым (т.е. наиболее нагруженным) узлом конструкции является верхняя рама. Снижение уровня напряжений за счет усиления конструкции не является рациональным, так как ведет к увеличению массы тары вагона и его жесткости. При увеличении жесткости конструкции возрастают динамические силы в зоне удара. Снижение уровня напряжений, возникающих при ударном нагружении возможно при подсыпке на пол вагона защитного слоя (песка, измельченной руды и т.п.), а также за счет амортизации пола вагона. Однако, как показывает практика эксплуатации вагонов-самосвалов, это условие не всегда выполняется, и достаточно часто удар глыбой значительного веса происходит по незащищенному полу вагона. Поэтому на предпроектной стадии работ по созданию новой конструкции думпкаров и модернизации существующей необходимо проводить исследование напряженного состояния при ударном нагру-

жении. Причем за основной режим исследования следует принять удар глыбой большого веса непосредственно по незащищенному полу вагона.

Для обоснования выбора теории удара, которую следует использовать при аналитическом исследовании напряженного состояния конструкции думпкаров, были проведены специальные эксперименты [1]. На незащищенный пол вагона сбрасывался стальной шар весом 2,8 кН по центру вагона. Величины наибольших напряжений в центральной поперечной балке верхней рамы приведены на рис. 1. Величины этих напряжений показаны круглыми маркерами. Из приведенного рис. 1 видно, что наибольшие напряжения в продольной балке верхней рамы возникают вблизи места падения шара, и величина этих напряжений резко уменьшается по удалению от места удара. На рис. 1 вдоль оси x отложены величины x/l , где l – длина вагона. По оси ординат отложены напряжения в центральной продольной балке. В этом случае из уравнения поперечного упругого удара С. П. Тимошенко [2] определяется ударная сила. Затем при помощи метода конечных элементов по найденной ударной силе как функции времени определяются напряжения в элементах конструкции думпкара.

Результаты определения напряжений в центральной продольной балке приведены на рис. 1 (их значения показаны сплошными линиями).

Из осциллограмм, полученных в опытах по ударному нагружению вагона-самосвала падающим грузом, видно, что в этом случае вагон совершает три-четыре затухающих колебания в вертикальной плоскости. Следовательно, ана-

литическое исследование ударного нагружения вагона-самосвала следует проводить по объединенной теории поперечного удара С. П. Тимошенко, в которой учитываются как местные деформации в зоне контакта, так и общие колебания вагона-самосвала. Это уравнение имеет вид [1, 2]:

$$v_0 t + g \frac{t^2}{2} - \frac{1}{M} \int_0^t \int_0^t F(\tau) d\tau = \alpha(F) + q(t), \quad (1)$$

где v_0 – скорость падающего тела в момент соприкосновения с телом вагона; $q(t)$ – перемещение ударяемой конструкции в месте удара, при колебаниях, вызванных ударной силой; $\alpha(F)$ – местное смятие в месте удара.

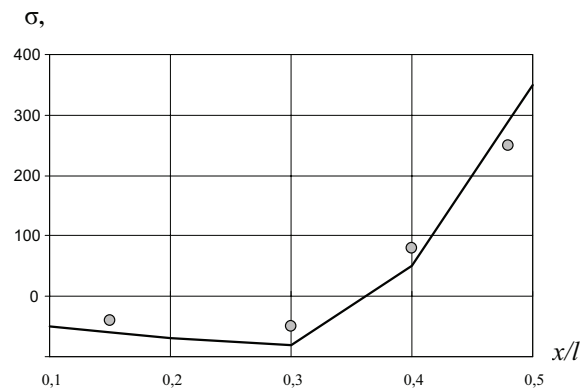


Рис. 1. Напряжения в верхней раме думпкара

Величина $\alpha(F)$ определяется по теории Герца и зависит от формы и материала соударяемых тел. При падении глыбы в форме шара непосредственно на пол вагона можно воспользоваться формулой, полученной А. Н. Динником для случая удара шара по упругому полупространству [3]:

$$\alpha(F) = k [F(t)]^{\frac{2}{3}}. \quad (2)$$

За упругое полупространство примем пол вагона, верхнюю и нижнюю рамы. Тогда коэффициент "k" определим следующим образом:

$$k = \left(\frac{9}{256R} \right)^{\frac{1}{3}} \left[\frac{4(1-\mu_1^2)}{E_1} + \frac{4(1-\mu_2^2)}{E_2} \right]. \quad (3)$$

В нашем случае ударяемая конструкция изготавливается из различных материалов. Настил пола состоит, например, из стальных листов с амортизационной прослойкой между ними (чаще всего деревянные брусья). Пол вагона опирается на верхнюю раму, состоящую из стальных поперечных и продольных балок. Верхняя рама вместе с продольными и поперечными балками, продольными и лобовыми

стенками опирается на нижнюю с помощью опор, расположенных на кронштейнах. Величину E_2 (эквивалентный модуль упругости) будем определять по скорости распространения упругой волны a_{cp} в направлении удара. В этом случае:

$$E_2 = a_{cp}^2 \rho_{cp},$$

где ρ_{cp} – средняя плотность материала в направлении удара:

$$a_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i}{\sum_{i=1}^n t_i}; \quad (4)$$

$$\rho_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i n_i}{\sum_{i=1}^n n_i}. \quad (5)$$

В формулах (4) и (5): n – количество элементов конструкции в направлении удара; ρ_i – плотность i -го элемента в направлении удара; t_i – время прохождения упругой волны по i -му элементу.

Величины t_i и a_i определяются по формулам (4) и (5):

$$t_i = \frac{n_i}{a_i}, \quad a_i = \sqrt{\frac{E_i}{\rho_i}},$$

где E_i – модуль Юнга i -го элемента конструкции думпкара.

При определении прогиба конструкции в точке удара $q_i(t)$ использовалась расчетная схема думпкара в виде пространственной стержневой системы с массами, сосредоточенными в узлах.

Результаты определения напряжений с использованием уравнения (1) приведены на рис. 1, где сплошными линиями нанесены наибольшие напряжения в различных сечениях центральной продольной балки верхней рамы. Как видно из рис. 1, результаты аналитического решения удовлетворительно согласуются с результатами экспериментов.

При ударе глыбой по полу вагона, покрытому защитным слоем из песка, измельченной руды, гравия и т.п., используется также уравнение (1), расчетная схема остается такой же, как и при ударе глыбой по незащищенному полу вагона. В этом случае масса защитного слоя добавляется к массе конструкции вагона. Особенность расчета сказывается в необходимости

определения зависимости α от силы F в уравнении (1). Такая зависимость устанавливается экспериментально для различных форм падающего тела, размеров кусков груза (грануляционного состава), скорости деформирования, толщины и физических свойств защитного слоя.

Численная реализация теории поперечного удара С. П. Тимошенко позволяет учесть местные (как упругие, так и неупругие) деформации в каждой конкретной задаче. Например, можно учесть влияние защитного слоя, местные упругие и неупругие деформации, разрушение падающего тела в месте контакта и т.д. Зависимости контактного смятия $\alpha(F)$ устанавливаются аналитически и экспериментально [4].

Если принять во внимание местные неупругие деформации, то (как показывают теоретические и экспериментальные исследования [1, 4]) увеличивается время удара, снижается величина F_{max} , и, следовательно, уменьшаются напряжения в элементах конструкции вагона-самосвала.

Рассмотрим решение динамической задачи об ударном нагружении вагона-самосвала сосредоточенным грузом большой массы (30 кН и более). Практика эксплуатации думпкаров показывает, что, как правило, в таком случае в месте падения сосредоточенного груза имеют место неупругие (пластические) деформации. Для аналитического решения поставленной задачи использовалась теория удара Сирса-Тимошенко с учетом пластических деформаций и метода конечных элементов (МКЭ) в динамической постановке.

Ниже рассмотрена методика оценки нагруженности вагонов-самосвалов при поперечном ударе глыбой с учетом нелинейных свойств настила пола и упругопластических местных деформаций. Приведен пример динамического расчета вагона-самосвала модели 33-677 на удар падающей глыбой. В качестве «бойка» использовался чугунный полушар, падающий сферической поверхностью непосредственно на пол вагона. Для полушара во внимание принимались только местные упругие деформации, для вагона – упругие и пластические, определяемые формулами (2) и (3).

Пластическая составляющая сближения соударяющихся тел β связана с ударной силой $F_{y\delta}$ кусочно-линейной зависимостью:

$$\beta = \begin{cases} 0, & \text{если } F_{y\delta} \leq F_p \text{ и } F_{y\delta} - \text{возрастает;} \\ X(F_{y\delta} - F_p), & \text{если } F_{y\delta} > F_p \text{ и } F_{y\delta} - \text{возрастает;} \\ \beta_{max}, & \text{если } F_{y\delta} < F_{max}^* \text{ и } F_{y\delta} - \text{убывает;} \end{cases} \quad (6)$$

где F_p – значение ударной силы, после превышения которого возникают пластические деформации пола в зоне контакта; X – постоянный коэффициент, который выбирается на основании данных натуральных испытаний думпкара при сбрасывании груза-бойка со сферической нижней поверхностью на незащищенный пол кузова, и который пригоден для думпкаров подобных конструкций; β_{max} и F_{max} – наибольшие значения β и $F_{y\delta}$ соответственно.

Графики зависимостей $F_{y\delta}$ от α и β представлены на рис. 2, где вправо от оси ординат отложена величина α , а влево β .

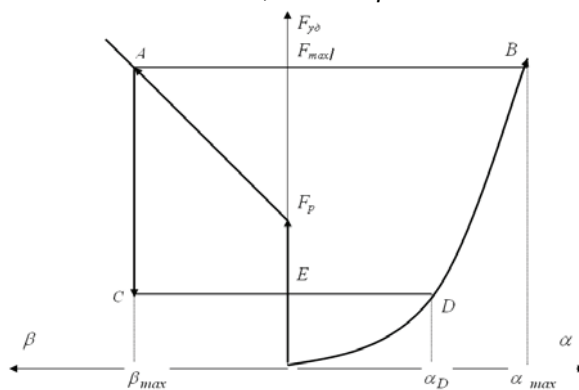


Рис. 2. Зависимость упругих и пластических деформаций от ударной силы

Полная величина местных деформаций в зоне удара при любых значениях $F_{y\delta}$ определяется суммированием соответствующих абсцисс α и β . Если, достигнув некоторого максимального значения $F_{y\delta} = F_{max}$, ударная сила начнет уменьшаться, то в процессе разгрузки величина сближения β , обусловленного пластической деформацией, остается неизменной. Так, например, если ударная сила, достигнув значения F_{max} , уменьшается затем до значения, соответствующего точке E на рис. 2, то суммарная величина сближения соударяемых тел изменяется от $AB = \alpha_{max} + \beta_{max}$ до $CD = \alpha_D + \beta_{max}$.

При повторных соударениях ударная сила обычно не превышает величину F_{max} , достигнувшую при предыдущих соударениях, тогда вследствие упрочнения материала вообще не будут возникать дополнительные пластические деформации в зоне контакта. Если же ударная сила превысит F_{max} , то зависимость $\beta = \beta(F_{y\delta})$ будет отличаться от (6) и примет вид:

$$\beta = \begin{cases} \beta_{max}, & \text{если } F_{y\delta} \leq F_{max} \text{ и } F_{y\delta} - \text{возрастает;} \\ X(F_{y\delta} - F_p), & \text{если } F_{y\delta} > F_{max} \text{ и } F_{y\delta} - \text{возрастает;} \\ \beta_{max}^*, & \text{если } F_{y\delta} < F_{max}^* \text{ и } F_{y\delta} - \text{убывает.} \end{cases} \quad (7)$$

Здесь β_{max}^* и F_{max}^* – новые максимальные значения величин β и $F_{y\delta}$.

Структурная схема вагона-самосвала, рассчитываемого на удар падающим упругим телом, изображена на рис. 3.

Элементы конструкции думпкара, кроме амортизирующей прослойки, представляют собой линейно-упругие тела, поведение которых при ударе можно описать с помощью системы линейных дифференциальных уравнений, используя процедуру МКЭ. Амортизирующую прослойку, передающую нагрузку от броневых листов на верхнюю раму и имеющую нелинейную жесткостную характеристику на растяжение-сжатие, моделировать деформируемым телом в рамках процедуры МКЭ достаточно сложно, так как в ходе решения динамической задачи будет изменяться матрица жесткости всей конструкции.

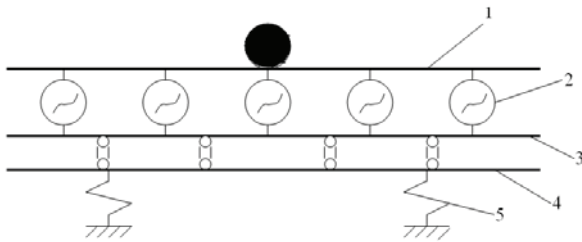


Рис. 3. Структурная схема вагона-самосвала: 1 – слой металла, лежащие выше амортизирующей прослойки; 2 – амортизирующая прослойка; 3 – верхняя рама с бортами и лобовой стенкой; 4 – нижняя рама с обрессоренной частью тележки; 5 – комплект рессорного подвешивания тележки

Работа амортизирующей прослойки и свободное опирание (односторонние связи) верхней рамы на нижнюю в предлагаемой методике моделируются посредством нелинейных связей. Нелинейная связь – пара равных по величине сил, действующих на связываемые ею элементы вдоль прямой с противоположенными знаками. Величина этих сил F , которые будем далее называть силами взаимодействия, определяется при решении динамической задачи из уравнений связи вида:

$$F = k \cdot f(\Delta), \quad (8)$$

где $f(\Delta)$ – нелинейная или кусочно-линейная функция, качественно характеризующая упругие свойства амортизирующей прослойки; Δ – деформация амортизирующей прослойки; k – коэффициент, зависящий от конструкции верхней рамы и ее разбивки на конечные элементы.

Нетрудно заметить, что к нелинейным связям относится и связь между металлическим шаром и броневым листом, возникающая с момента их контакта и задаваемая ударной силой $F_{y\delta}$, которую будем определять в процессе ре-

шения задачи об ударе при использовании соотношения (2) – (8).

Подытожив выше сказанное, будем полагать, что расчетная схема вагона-самосвала, рассчитываемого на удар падающим сосредоточенным грузом, может быть представлена в виде системы линейно-упругих тел (как это изображено на рис. 4), связанных между собой силами взаимодействия.

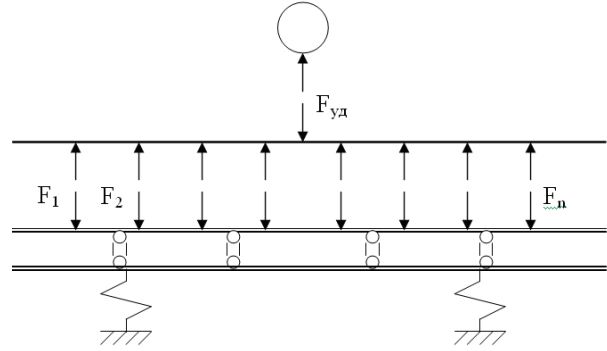


Рис. 4. Расчетная схема вагона-самосвала

Движение исследуемой конструкции и падающего тела при ударе описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} [M_1] \cdot \ddot{X} + [K_1] \cdot X = B \cdot F_{y\delta} - \sum_{i=1}^n D_{1i} \cdot F_i, \\ [M_2] \cdot \ddot{Y} + [K_2] \cdot Y = \sum_{i=1}^n D_{2i} \cdot F_i, \\ M \cdot \ddot{Z} = -F_{y\delta} + Mg; \end{cases} \quad (9)$$

с начальными условиями:

$$\begin{cases} X_{t=0} = 0, & Y_{t=0} = 0, & Z_{t=0} = 0, \\ \dot{X}_{t=0} = 0, & \dot{Y}_{t=0} = 0, & \dot{Z}_{t=0} = v_0, \end{cases} \quad (10)$$

Здесь $[M_1]$, $[K_1]$ – матрицы масс и жесткости ансамбля конечных элементов, представляющие броневую лист; $[M_2]$, $[K_2]$ – аналогичные матрицы верхней и нижней рам, учитывающие массу обрессоренной части тележки и жесткость пружин рессорного комплекта;

X , \ddot{X} , Y , \ddot{Y} – векторы перемещений и ускорений соответственно броневых листов и рам вагона; M , V , \ddot{Z} – масса, скорость и ускорение центра тяжести ударяющего тела; $F_{y\delta}$ – ударная сила, прикладываемая в точках контакта к броневому листу и ударяющему телу; F_i – i -я сила взаимодействия между броневым листом и верхней рамой, моделирующая работу амортизирующей прослойки; B – вектор, задающий место приложения силы $F_{y\delta}$; D_{1i} , D_{2i} – векторы, определяющие места приложения силы F_i к

броневому листу и верхней раме вагона-самосвала соответственно.

В общем случае зависимость ударной силы $F_{уд}$ и сил взаимодействия F_i от времени неизвестны, следовательно, правые части системы дифференциальных уравнений (9) не определены. Для нахождения значений этих сил в конкретный момент времени t будем использовать уравнения связи, полученные на основании соотношений (2), (6) – (8).

Уравнение связи для определения ударной силы составляется согласно теории удара Герца с учетом местных пластических деформаций и имеет следующий вид:

$$z - x_m = \bar{k} \cdot F_{уд}^{2/3} + \beta \quad (11)$$

где z – перемещение центра тяжести падающего тела; x_m – перемещение броневых листа в точке контакта с ударяющим телом.

Силы взаимодействия отыскиваются из уравнений связи (6) и (7), составленных на основании упругих свойств амортизирующей прослойки, конструкции верхней рамы думпкара и ее разбивки на конечные элементы:

$$F_i = k_i \cdot f(x_i, y_i, \beta), \quad i = \overline{1, n}. \quad (12)$$

Здесь x_i и y_i – перемещения точек броневых листа и верхней рамы, относительное перемещение которых определяет степень сжатия амортизирующей прослойки в зоне приложения i -ой силы взаимодействия.

Следовательно, решение задачи об ударе вагона-самосвала падающим грузом с учетом нелинейных свойств амортизирующей прослойки пола и местных упругопластических деформаций, сводится к решению группы матричных дифференциальных уравнений (9) с начальными условиями (10) совместно с уравнениями связи (11) и (12).

С целью проверки методики динамического расчета на прочность вагонов-самосвалов при ударе падающим грузом во время приемочных испытаний вагона-самосвала модели 33-9035 была проведена серия опытов по сбросу груза-бойка на незащищенный пол вагона.

На рис. 5 приведены магнитограмма ударной силы, записанная при сбросе груза-бойка в шкворневое сечение с высоты 25 см на незащищенный пол кузова, и расчетная зависимость ударной силы, полученная при решении аналогичной динамической задачи с учетом местных пластических деформаций.

На графиках ударной силы (экспериментальной и расчетной) в начальной фазе активного

ударного процесса хорошо видны высокочастотные колебания. После того как ударная волна достигает верхней рамы, колебания затухают и ударная сила растет плавно. В пассивной фазе расчетная ударная сила убывает, колеблясь с такой же частотой, как и вначале удара, но с гораздо меньшей амплитудой. Последнее можно объяснить дискретностью конечно-элементной расчетной схемы вагона-самосвала.

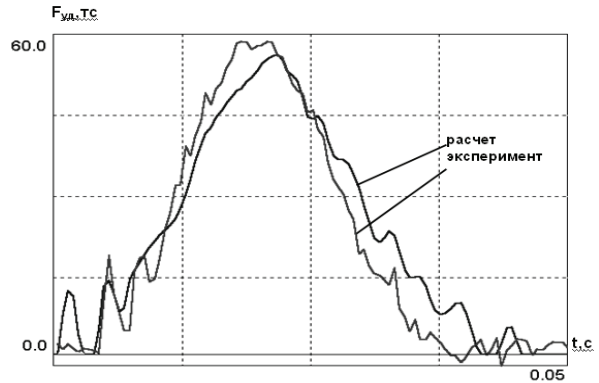


Рис. 5. Магнитограмма и расчетная зависимость ударной силы от времени при шкворневом ударе грузом-бойком (стальным шаром) массой 30 кН с высоты 25см по незащищенному полу кузова думпкара

Таблица 1

Результаты расчета и экспериментальные данные ударного нагружения падающим грузом думпкара модели 33-9035

Энерг. Удара, кДж	Тип данных	Центральный удар						
		$F_{уд}$, кН	$\sigma_{ноп}$, МПа	$\sigma_{пр}$, МПа	$\sigma_{бок}$, МПа	$\sigma_{хр}$, МПа	$\sigma_{кр}$, МПа	$W_{пл}$, мм
3,68	Р	348	245	135	76	42	-40	6
	Э	360	245	105	75	35	-35	7
7,35	Р	555	404	219	136	61	-62	15,4
	Э	520	380	165	105	50	-65	17
11,03	Р	728	567	301	195	71	-86	26
	Э	640	текуч.	290	155	60	-85	26
Шкворневой удар								
3,68	Р	396	180	70	66		-20	7
	Э	400	145	60	50		-20	9
7,35	Р	636	292	112	106		-32	18,2
	Э	580	235	105	90		-35	20
11,03	Р	728	392	153	143		-44	31
	Э	680	375	140	135		-55	31

В табл. 1 приведены максимальные расчетные и экспериментальные значения ударной силы, напряжений в опасных сечениях несущих элементов конструкции думпкара и пластических изгибных деформаций (глубина вмятин) в зоне удара для шкворневого и центрального ударов при падении груза-бойка с высоты 12.5, 25 и 37.5 см.

Как видно из результатов, приведенных в табл. 1, результаты динамического прочностного

расчета удовлетворительно совпадают с данными натуральных испытаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Расчет грузовых вагонов на прочность при ударах [Текст] : учебн. пособие для ВУЗов ж. д. трансп. / Е. П. Блохин и др. – М.: Транспорт, 1989. – 230 с.
2. Тимошенко, С. П. Прочность и колебания упругих элементов конструкций [Текст] / С. П. Тимошенко. – Главн. ред. физ.-мат. лит-ры изд-ва «Наука», 1975. – 704 с.
3. Динник, А. Н. Удар и сжатие упругих тел [Текст] / А. Н. Динник // Избранные труды. – т. 1. – К.: УН УССР, 1952. – С. 15-113.
4. Барбас, И. Г. Экспериментальное исследование напряженного состояния верхней рамы думпкара при ударе падающим грузом [Текст] / И. Г. Барбас и др. // Тр ВНИИвагоностроения. – 1974. – Вып. 24. – С. 96-102.
5. Кострица, С. А. Применение метода конечных элементов к исследованию прочности кузовов вагонов-самосвалов при ударах / С. А. Кострица [Текст] // Нагруженность и прочность подвижного состава. – Д.: ДИИТ, 1998. – 145 с.
6. Султан, А. В. Экспериментально-теоретическое исследование нагруженности вагона-самосвала модели 33-9035 [Текст] / А. В. Султан. – Д.: Арт-Пресс, 2000. – С. 126-129.

Поступила в редколлегию 21.08.2009