

В. Л. ХАВИН, Б. Н. КИРКАЧ, А. Б. КИРКАЧ, А. В. СТЕПУК

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ЭЛЕМЕНТА ЗАЩИТНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И УДАРЕ.

Представлені результати комплексних іспитів на міцність окремих елементів та пакетів елементів тонкостінної захисної конструкції. З іспитів на розтягання отримані значення розривних зусиль для фрагментів захисної конструкції, що складаються з двох, трьох та чотирьох послідовно з'єднаних елементів. Також проведені іспити окремих елементів захисної конструкції на удар конічним сталевим пробійником. На підставі отриманих експериментальних даних проведена оцінка ступеня руйнівного (проникаючого) впливу при ударі в залежності від кінетичної енергії пробійника, а також розривної міцності замкових елементів з'єднань.

Ключові слова: захисна конструкція, міцність на розрив, руйнування, ударна дія, тонкостінний елемент.

Представлены результаты комплексных испытаний на прочность одиночных элементов и пакетов элементов тонкостенной защитной конструкции. Путем испытаний на растяжение получены величины разрывных усилий для фрагментов защитной конструкции, состоящих из двух, трех и четырех последовательно соединенных элементов. Также проведены испытания одиночных элементов защитной конструкции на удар коническим стальным пробойником. На основе полученных экспериментальных данных произведена оценка степени разрушающего (проникающего) воздействия при ударе в зависимости от кинетической энергии пробойника, а также разрывной прочности замковых элементов соединений.

Ключевые слова: защитная конструкция, прочность на разрыв, разрушение, ударное воздействие, тонкостенный элемент.

The results of an experimental strength study on single- and multi-element fragments of a multi-component thin-wall roller shutter protective structure are presented. In the framework of the study tensile tests were conducted to measure the in-plane rupture strength of the roller curtain using two-, three- and four-lath fragments of the structure. Also the impact tests on single-lath specimens of the roller shutter hit by a conical steel punch were performed. The results of the measurements were used to estimate the dependence of the kinetic puncher energy on the amount of impact penetration as well as the per unit length lock rupture force of the roller structure. The results obtained should contribute to the enhanced design and reliability of such protective structures as well as objects equipped with them.

Keywords: roller shutter structure, tensile strength, rupture, impact loading, thin-wall element.

Введение. Для защиты помещений от несанкционированного проникновения зачастую применяют защитные конструкции, охранные свойства которых напрямую зависят от их качества. Такие конструкции имеют многокомпонентную структуру, состоящую из пластинчатых элементов различной конфигурации, скрепленных замками. Антивандальные свойства таких конструкций определяются их стойкостью к разрывным и ударным нагрузкам. Прогнозирование величины разрывного усилия и энергии разрушения при точечном ударе элементов защитных конструкций позволяет сформулировать рекомендации по увеличению прочности и жесткости всей конструкции в целом.

Анализ последних исследований и литературы. Вопросы ударного деформирования тонкостенных конструкций рассмотрены в ряде работ [1-3]. В работе [6] численными и аналитическими методами исследуется прочность одно- и двумерных тонкостенных конструкций, обладающих ребрами жесткости, при динамическом воздействии. Методом конечных элементов получено напряженно-деформированное состояние тонких пластин под действием свободно падающего груза [7]. В работе [5] рассмотрено деформирование тонкостенной П-образной конструкции при ударе шаром.

Как правило, при численном моделировании ударных процессов вводится ряд упрощающих пред-

положений, которые могут внести определенные погрешности в результаты вычислений. Поэтому возникает необходимость в проведении экспериментальных исследований, результаты которых имеют как самостоятельную ценность, так и могут быть использованы для оценки точности численных моделей.

Цель работы – экспериментальное определение минимальной кинетической энергии разрушающего (проникающего) воздействия конического пробойника на элемент защитной конструкции коробчатого профиля с ребрами жесткости, а также разрывных усилий для фрагментов конструкции, состоящих из двух, трех и четырех ее элементов.

Методика и результаты испытания на ударное разрушение элемента защитной конструкции.

Испытание на ударное разрушение (пробой) производилось путем ударного нагружения массивным коническим стальным пробойником весом 1 кг многокомпонентного элемента защитной составной конструкции. Элемент включает наружную (1-й слой) и внутреннюю (2-й слой) тонкие пластины, соединенные поперечными ребрами жесткости, а профиль имеет коробчатое сечение (рис. 1). Ударное воздействие осуществляется по нормали к пробиваемой поверхности. Аналогичная задача решалась численно в работе [6].

Обеспечивалась прямолинейная траектория дви-

жения пробойника. Постепенное уменьшение высоты падения ударника h позволило определить минимальные ее значения h_{min} , соответствующие как полному сквозному пробитию элемента, так и разрушению только наружного слоя. Потенциальная энергия гравитационного поля, соответствующая высоте падения ударника h_{min} , позволяет определить минимальную кинетическую энергию ударного разрушения.

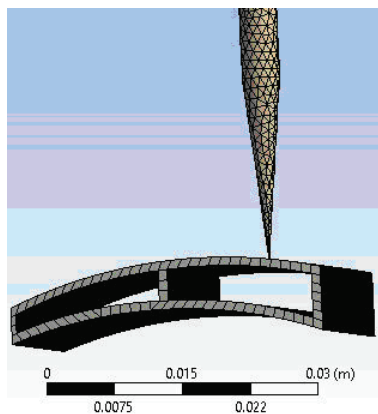


Рисунок 1 – Ударное разрушение элемента защитной конструкции

Эксперименты на ударное разрушение проводились на специально для этих целей изготовленном испытательном стенде, включающем в себя крепление для испытуемых образцов, направляющее устройство и конический ударник. В ходе испытаний было исследовано 10 образцов, 6 из которых были нагружены до полной пробивки (оба слоя), 4 других образца были доведены до разрушения только наружного слоя.

Ударное воздействие осуществлялось в зонах, удаленных от ребер жесткости. На рис. 2 представлены экспериментальные образцы, имеющие различный характер разрушения.

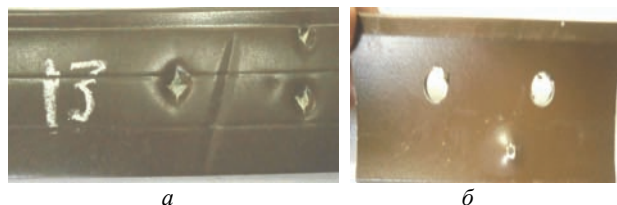


Рисунок 2 – Результаты экспериментов: а – поверхностное разрушение, б – сквозное отверстие

Полученные результаты, приведенные в табл. 1, позволяют оценить скорость удара, наносимого стальным ударником с углом атаки 30° и энергию (работу) разрушения (пробития) образца элемента защитной конструкции.

Оценка минимальной энергии разрушающего (проникающего) ударного воздействия производилась на основе равенства потенциальной энергии поднимаемого ударника U_{II} и его кинетической энергии U_K в момент соударения (потери на трение не учитывались):

$$U_{II} = U_K \Rightarrow m_0 g h_{min} = m_0 \frac{v_{min}^2}{2}, \quad (1)$$

где m_0 – масса ударника, g – ускорение свободного падения, h_{min} и v_{min} – минимальные высота падения и скорость пробойника в момент соударения при разрушающем (проникающем) воздействии соответственно.

Таблица 1 – Результаты экспериментов по ударному разрушению элемента защитной конструкции

N п/п образца	Разрушение двух слоев (полное пробитие)		Разрушение наружного слоя	
	Высота падения h , мм	Результат эксперимента	Высота падения h , мм	Результат эксперимента
1	1600	Пробито 2 слоя	-	-
2	1400	Пробито 2 слоя	-	-
3	1300	Пробито 2 слоя	-	-
4	1000	Пробито 2 слоя	-	-
5	800	Пробито 2 слоя	-	-
6	600	Пробито 2 слоя	-	-
7	500	Пробит 1 слой	500	Пробит 1 слой
8	-	-	300	Пробит 1 слой
9	-	-	250	Пробит 1 слой
10	-	-	200	Не пробит 1 слой
Энергия разрушения, Нм	5,88		2,45	
Мин. скорость при разрушении, м/с	0,767		0,495	

Полученные экспериментальные оценки минимальной энергии и скорости ударного разрушения позволяют легко определять минимальную скорость разрушающего соударения в зависимости от массы ударника:

$$v_{1min} = \left(\frac{m_0}{m_1} \right)^{1/2} v_{min}, \quad (2)$$

где m_0 , v_{min} – масса и минимальная скорость ударника, обеспечивающая разрушающее воздействие ударника

на элемент защитной конструкции, v_{1min} – минимальная скорость соударения защитной конструкции с телом массой m_1 , обеспечивающая разрушающее воздействие.

Например, скорость пробивающего удара для двух слоев тонкостенного образца составит:

– для пробойника массой 0,5 кг:

$$v_{1min} = \left(\frac{m_0}{m_1} \right)^{1/2} v_{min} = \left(\frac{1}{0,5} \right)^{1/2} 0,767 = 1,08 \text{ м/с.}$$

– для пробойника массой 5 кг:

$$v_{1\min} = \left(\frac{m_0}{m_1}\right)^{1/2} v_{\min} = \left(\frac{1}{5}\right)^{1/2} 0,767 = 0,343 \text{ м/с.}$$

Экстраполируя результаты измерений, полученные на лабораторных образцах, на реальную конструкцию, необходимо учитывать, что при ширине в 1 метр она обладает гораздо большей податливостью, а угол заострения реального пробойника может увеличиваться. Поэтому можно ожидать, что минимальная скорость разрушающего воздействия на практике будет выше (по примерным оценкам до 2-3 раз).

Методика и результаты испытания на разрыв в поперечном направлении. Фрагменты защитной конструкции, состоящие из двух, трех и четырех ее элементов, соединенных между собой в замках, испытывались на растяжение в поперечном направлении на машине FP-100 для определения величины погонного (распределенного) разрушающего усилия. Растягивающее усилие прикладывалось в направлении, перпендикулярном замковому соединению элементов (рис. 3).



Рисунок 3 – Испытание на растяжение образцов из двух элементов

Двухэлементный фрагмент шириной 10 см шарнирно закреплялся в захватах испытательной машины FP-100 с помощью разработанного оригинального V-образного приспособления, позволяющего равномерно распределить растягивающее усилие по ширине образца и максимально уменьшить возможность перекосов и величину местных деформаций. В процессе силового нагружения на силоизмерителе испытательной машины регистрировалось максимальное усилие (F_{max}), соответствующее моменту разрушения. Для контроля измерений также регистрировалось удлинение, достигнутое к моменту разрушения (Δl_{max}). Основные результаты испытаний сведены в табл. 2.

Обработка полученных результатов позволила с достаточной точностью получить величину распределенного разрушающего усилия $f_{max} = 15,5 \text{ Н/мм}$. Во всех случаях имело место разрушение замковых соединений экспериментальных образцов (рис. 4).

Для учета влияния на величину разрушающего усилия количества элементов в соединении были проведены эксперименты по испытанию на растяжение трех- и четырехэлементных фрагментов. Численные результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 2 – Результаты испытаний на растяжение двухэлементных фрагментов

Номер образца	Максимальное (разрывное) усилие F_{max} , Н	Удлинение к моменту разрушения Δl_{max} , мм	Распределенное разрывное усилие f_{max} , Н/мм
1	1550	7,0	15,5
2	1350	5,0	13,5
3	1750	6,0	17,5
4	1550	7,0	15,5
5	1550	7,0	15,5
Среднее значение	1550	6,4	15,5

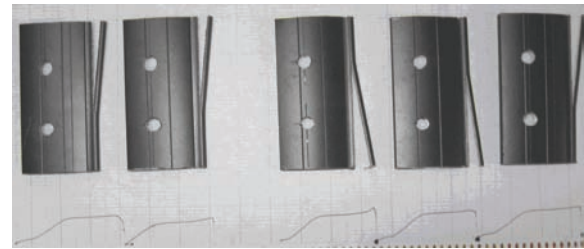


Рисунок 4 – Характер разрушения при разрыве образцов

Таблица 3 – Результаты испытаний для трех- и четырехэлементных фрагментов

Кол-во элементов в образце	Максимальное (разрывное) усилие F_{max} , Н	Удлинение к моменту разрушения Δl_{max} , мм	Распределенное разрывное усилие f_{max} , Н/мм
3	1500	9,8	15,0
4	1550	13,2	15,5
Среднее значение	1525	-	15,25

Выводы. В результате экспериментальных исследований была дана оценка «антивандалных» свойств защитной конструкции, изготовленной из алюминиево-магниевого сплава. Были проведены серии испытаний пластинчатых элементов конструкции коробчатого профиля с ребрами жесткости на растяжение (разрыв) и ударное нагружение (пробой).

Результаты экспериментов, проведенных на фрагментах защитной конструкции, состоящих из двух, трех и четырех ее элементов, а также последующие оценочные расчеты, позволили определить величину максимального усилия, приводящего к потере несущей способности защитной конструкции произвольных размеров. Была получена энергия разрушения и зависимости, позволяющие получить минимальные скорости разрушающего воздействия.

Список литературы:

1. Баженов В.Г. Исследование упругопластических процессов деформации круглых пластин при импульсном нагружении с учетом больших прогибов / В.Г. Баженов, М.А. Батанин // Прикл. механика. – 1978. – №3. – С. 74-78.
2. Воробьев Ю.С. Скоростное деформирование элементов конструкций в упругопластической стадии / Ю.С. Воробьев, М. В. Чернобрышко // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – 2010. – Вип.14. – С. 87-92.

3. Бизюк А.В. Скоростной удар по тонкостенным конструкциям / А.В. Бизюк, В.В. Бизюк, А.В. Колодяжный // Вестник ХНУ ХПИ. – 2007. – № 775. – С. 29-35.

4. Дмитриева Л. М. Пластинки и оболочки, подкрепленные ребрами жесткости, под действием локальных динамических нагрузок / Л. М. Дмитриева // Исследования по теории пластин и оболочек. – 1976. – № 12. – С. 172-187.

5. Степук О. В. Особливості деформування П-подібної тонкостінної конструкції при ударі / О. В. Степук, Л. В. Автономова, С. В. Бондар // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 37. – С. 193-199.

6. Автономова Л. В. Деформирование П-образной тонкостенной конструкции с ребрами жесткости при ударе шаром / Л. В. Автономова, С. В. Бондарь, А. В. Степук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 6 (1049). – С. 3-8.

Bibliography (transliterated):

1. Vazhenov V.G., Batanin M.A. Issledovanie uprugoplasticheskikh processov deformacii kruglykh plastin pri impul'snom nagruzhennii s uchetom bol'shikh progibov. Prikl.

mehanika. 1978. No 3. P. 74-78.

2. Vorob'ev Ju., Chernobryvko V. Skorostnoe deformirovanie jelementov konstrukcij v uprugoplasticheskoj stadii. Problemy obchyslyval'noiyi mekhaniky i mitsnosti konstruksiy. 2010. Vol. 14. P. 87-92.

3. Bizjuk A.V., Bizjuk V.V., Kolodjazhnyj A.V. Skorostnoj udar po tonkostennym konstrukcijam. Vestnik NTU KhPI. 2007. No 775. P. 29-35.

4. Dmitrieva L. M. Plastinki i obolochki, podkreplennye rebrami zhestkosti, pod dejstviem lokal'nyh dinamicheskikh nagruzok. Issledovanija po teorii plastin i obolochek. 1976. No 12. P. 172-187.

5. Stepuk O. V., Avtomonova L. V., Bondar S. V. Osoblyvosti deformuvannya P-podibnoyi tonkostinnoyi konstruktsiyi pry udari. Visnyk NTU KhPI. Seriya: Matematychnye modelyuvannya v tekhnysiti ta tekhnolohiyakh. Kharkiv: NTU KhPI. 2013. No 37. P. 193-199.

6. Avtomonova L. V., Bondar' S. V. Stepuk A. V. Deformirovanie P-obraznoj tonkostennoj konstruktsii s rebrami zhestkosti pri udare sharom. Visnyk NTU KhPI. Seriya: Matematychnye modelyuvannya v tekhnysiti ta tekhnolohiyakh. Kharkiv: NTU KhPI. 2014. No 6 (1049). P. 3-8.

Поступила (received) 27.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Експериментальне дослідження міцності багатокомпонентного елемента захисної конструкції при розтягуванні та ударі / В. Л. Хавін, Б. М. Киркач, О. Б. Киркач, О. В. Степук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 39 (1261). – С. 81-84. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9130.

Экспериментальное исследование прочности многокомпонентного элемента защитной конструкции при растяжении и ударе / В. Л. Хавин, Б. Н. Киркач, А. Б. Киркач, А. В. Степук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 39 (1261). – С. 81-84. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9130.

Experimental study of strength of a multi-component protective structure element under tensile and impact loadings / V. L. Khavin, B. M. Kyrkach, O. B. Kyrkach, A. V. Stepuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 39 (1261). – С. 81-84. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2078-9130.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Хавін Валерій Львович – кандидат технічних наук, завідувач кафедри, НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: vkhavin@kpi.kharkov.ua.

Хавин Валерий Львович – кандидат технических наук, заведующий кафедры, НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: vkhavin@kpi.kharkov.ua.

Khavin Valeriy – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of department, NTU "KhPI", tel.: (057) 707-61-78, e-mail: vkhavin@kpi.kharkov.ua.

Киркач Борис Миколайович – кандидат технічних наук, професор, НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-62-02, e-mail: kirkach@kpi.kharkov.ua.

Киркач Борис Николаевич – кандидат технических наук, профессор, НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-62-02, e-mail: kirkach@kpi.kharkov.ua.

Kyrkach Borys – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Professor, NTU "KhPI", tel.: (057) 707-62-02, e-mail: kirkach@kpi.kharkov.ua.

Киркач Олексій Борисович – старший викладач, НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-62-02, e-mail: kyrkach@kpi.kharkov.ua

Киркач Алексей Борисович – старший преподаватель, НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-62-02, e-mail: kyrkach@kpi.kharkov.ua.

Kyrkach Oleksiy – Senior Lecturer, NTU "KhPI", tel.: (057)-70-762-02, e-mail: kyrkach@kpi.kharkov.ua

Степук Олександр Володимирович – кандидат физ.-мат. наук, ст. наук співробітник НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: abtop@yahoo.com.

Степук Александр Владимирович – кандидат физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: abtop@yahoo.com.

Stepuk Alexander – Candidate of Physics-Mathematical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, NTU "KhPI", tel.: (057) 707-61-78, e-mail: abtop@yahoo.com.