

Энергопоглощающие характеристики краш-бокса посадочного устройства возвращаемого аппарата

© Р.О. Луковкин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Определены энергопоглощающие характеристики тонкостенного энергопоглотителя (краш-бокса) перспективного посадочного устройства возвращаемого аппарата аэрокосмической системы. Рассмотрена верификация параметров оболочечной конечно-элементной модели малой размерности в программном комплексе MSC Nastran SOL700. Смоделирована тестовая задача упругопластического смятия квадратных алюминиевых образцов различной толщины. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Установлено, что предложенная математическая модель обеспечивает погрешность менее 10 % для образцов с отношением стороны сечения к толщине образца $C/s > 30$. На основании верифицированных параметров модели получены основные энергопоглощающие характеристики базового квадратного краш-бокса посадочного устройства, в конструкцию которого введены геометрические модификации для улучшения его демпфирующих свойств. Полученные результаты будут использованы для дальнейшего изучения характеристик перспективного посадочного устройства, содержащего энергопоглощающие элементы.

Ключевые слова: краш-бокс, энергопоглощение, MSC Nastran SOL700, посадочное устройство, численное моделирование

Введение. Тонкостенные трубчатые и коробчатые металлические конструкции широко применяются в качестве энергопоглощающих элементов [1], обладающих значительной эффективностью за счет прогрессирующего упругопластического складкообразования в процессе гашения энергии при ударных нагрузках. Подобные конструкции используются в различных отраслях машиностроения [2–4]. Наиболее полно достоинства тонкостенных абсорберов энергии раскрылись в автомобилестроении, где они используются как в качестве элементов силовых лонжеронов [5], так и в качестве самостоятельных одноразовых пластически сминающихся тонкостенных краш-боксов [6] — коробчатых оболочек переменного поперечного сечения, обеспечивающих процесс программируемого и контролируемого деформирования системы пассивной безопасности транспортного средства [7].

Применительно к космической технике возможные преимущества использования краш-боксов в несущей конструкции посадочного устройства (ПУ) современного многоразового космического аппарата описаны в работах [8, 9]. Особенностью создания таких краш-боксов является большой объем необходимых вычислений на этапе эскизного проектирования устройства. В первую очередь это связано

с разнообразием условий функционирования ПУ и составляющих его энергопоглощающих компонентов при приземлении космического аппарата с различными начальными скоростями и ориентацией в пространстве. Кроме того, на этапе эскизного проектирования предполагается рассмотрение различных вариантов конструктивного исполнения и сочетаний проектных параметров.

Таким образом, необходимо создать простую, но достоверную (точную) математическую модель энергопоглотителя ПУ, позволяющую получать наиболее важные характеристики процессов энергопоглощения при достаточно небольших затратах на компьютерные вычисления.

Цель данной работы — создать такую математическую модель тонкостенного энергопоглотителя ПУ в программном комплексе MSC Nastran SOL700 [10], где используются компоненты LS-Dyna и MSC Dytran для решения высоконелинейных динамических задач методом конечных элементов (КЭ) с использованием решателей, основанных на явных численных методах.

Верификация параметров расчетной модели. Для идентификации и верификации параметров расчетной модели в программном комплексе MSC Nastran SOL700 рассматривается модельная задача осевого смятия алюминиевых квадратных образцов толщиной $s = 0,8 \dots 2,0$ мм со стороной сечения $C = 36$ мм (рис. 1, а), выполненных из зарубежного алюминиевого сплава AA6061 O (отечественный аналог — сплав АД33). Результаты экспериментальных исследований смятия данных образцов приведены в работе [11].

Схема расчета и КЭ-сетка модельной задачи представлены на рис. 1, б. Абсолютно жесткая стенка движется вдоль оси OZ с постоянной скоростью $V = 1$ м/с и контактно взаимодействует с верхним торцом квадратного трубчатого образца длиной $L = 126$ мм, закрепленного по нижнему краю. В результате данного взаимодействия происходит упругопластическое складкообразование образца, определяющее искомые основные характеристики энергопоглощения конструкции: зависимость «усилие образца — ход стенки» $P(d)$, пиковую P_{\max} и среднюю P_m силы смятия, эффективную длину смятия δ и уровень поглощенной энергии $E_{\text{вн}}$ [11].

Настройка сеточной модели проведена в соответствии с рекомендациями, представленными в работах [12, 13]. Образец разбит на равносторонние оболочечные QUAD4-элементы таким образом, что его сторона содержит 16 элементов. Формулировка оболочечных элементов — полноинтегрируемая (параметр DYSHELLFORM = 16) с дополнительной опцией контроля hourglassing-эффекта (параметр DYHRGINHQ = 8). Число точек интегрирования 2D-элементов DYSHNIP = 5.

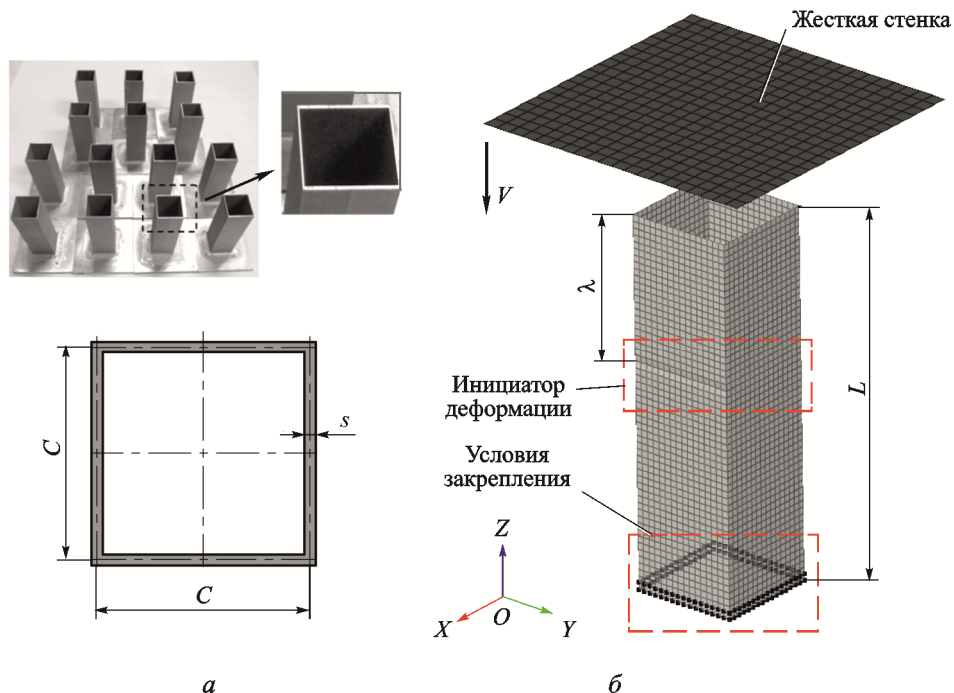


Рис. 1. Общий вид образцов (а) и расчетная КЭ-модель задачи (б)

На расстоянии λ от верхнего края образца введено начальное несовершенство конструкции путем перемещения узлов двух противоположных сторон на расстояние 0,2 мм. Данное действие согласует место инициации начальной складки модели в соответствии с экспериментом и повышает корректность результатов, получаемых численным моделированием [14].

Материал образцов AA6061 O имеет следующие механические характеристики [11]: модуль Юнга (модуль упругости) $E = 68,9$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,33$, плотность $\rho = 2730$ кг/м³, предел текучести $\sigma_T = 62,8$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 115,0$ МПа. Инженерная диаграмма деформирования материала представлена на рис. 2. В программном комплексе MSC Nastran SOL700 данный материал задается упругопластической моделью MATD024 и параметром DYLDKND = 0.

Жесткая стенка реализована с помощью упрощенной модели MATD020 материала недеформируемого твердого тела. Для контактного взаимодействия между стенкой и образцом, а также для взаимного контакта поверхностей

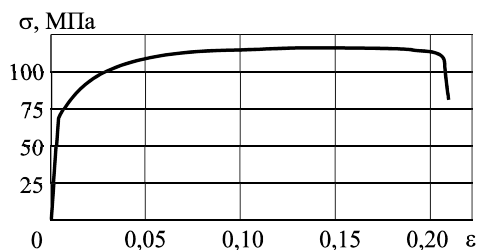


Рис. 2. Инженерная диаграмма деформирования сплава AA6061 O

образца принят коэффициент трения, равный 0,3 [11]. Кроме того, для повышения устойчивости счета и сглаживания возможных высокочастотных пиков получаемого решения задано незначительное глобальное демпфирование системы $DAMPGBL = 0,01$.

Полученные путем численного моделирования формы деформированных образцов различной толщины s представлены на рис. 3, зависимости «усилие — ход» $P(d)$ в сравнении с результатами натуральных экспериментов — на рис. 4.

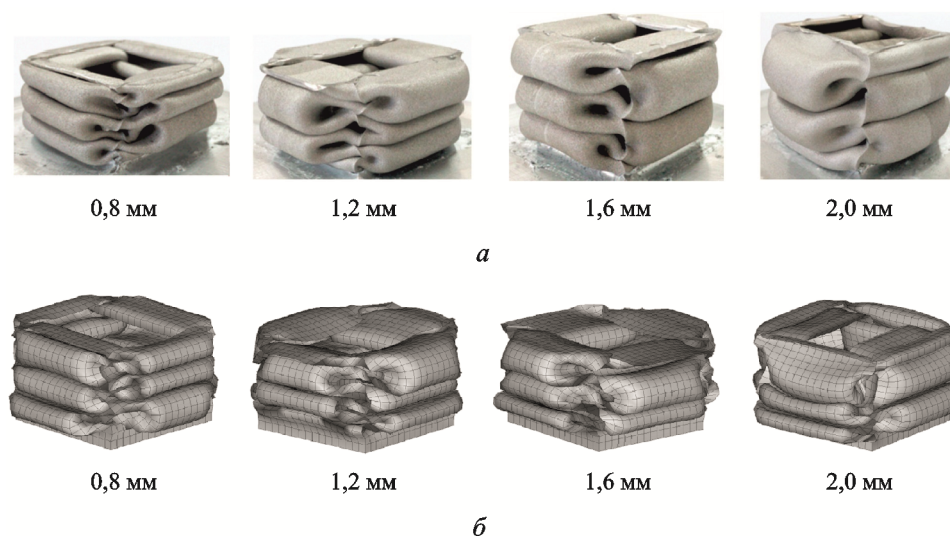


Рис. 3. Формы деформированных образцов:
a — эксперимент; *б* — моделирование

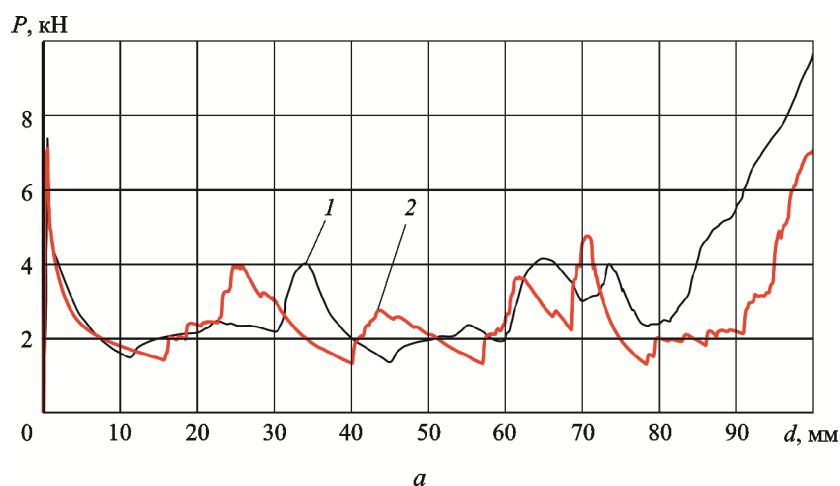


Рис. 4 (начало). Зависимости усилия смятия P образцов от перемещения d стенки:
a — $s = 0,8$ мм; 1 — эксперимент; 2 — моделирование

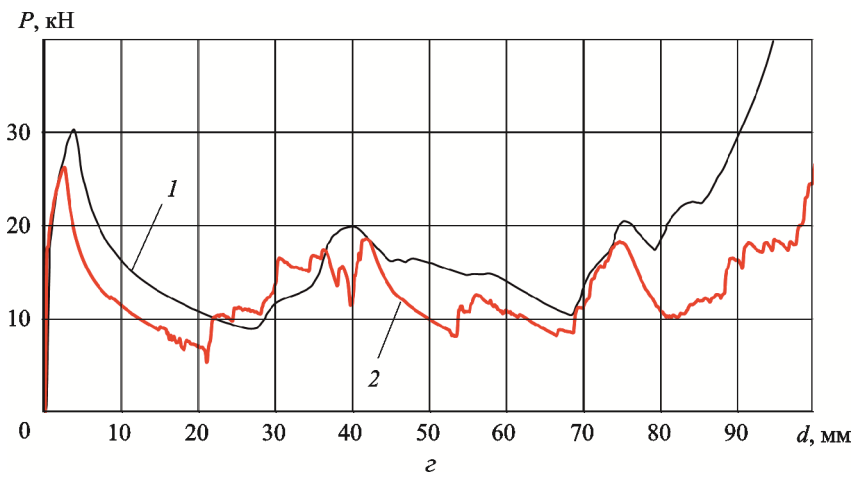
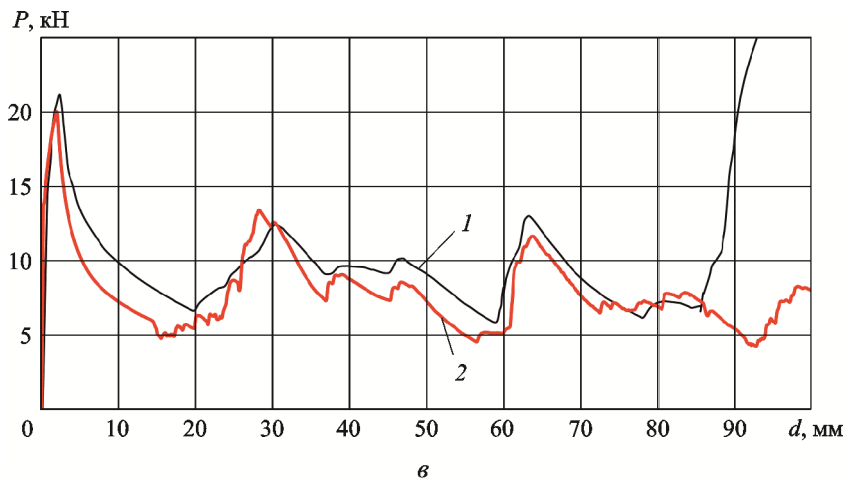
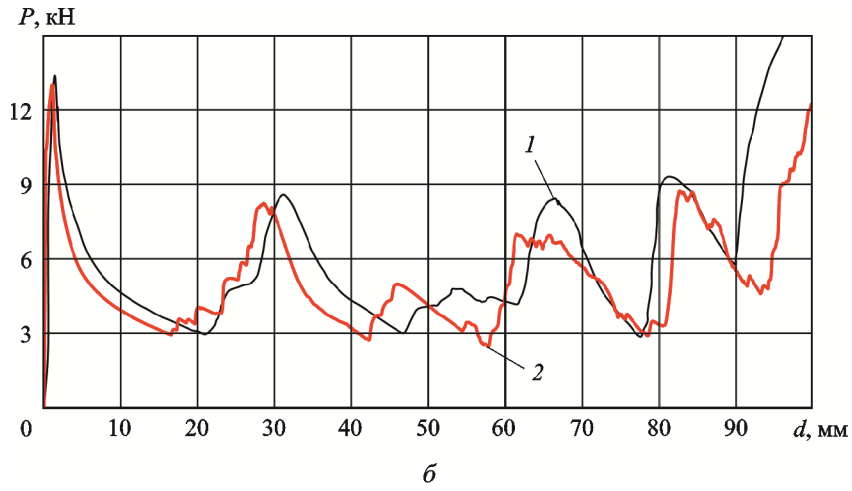


Рис. 4 (окончание). Зависимости усилия смятия P образцов от перемещения d стенки:
 δ — s равна 1,2; 1,6; 2,0 мм соответственно; 1 — эксперимент; 2 — моделирование

Результаты моделирования показывают хорошее совпадение с результатами испытаний как качественно (формы деформированных образцов и вид кривых, число образованных складок), так и количественно (частота и амплитуда пиков на кривых). Расхождение результатов численного моделирования с результатами экспериментов начинается на заключительном этапе деформирования при перемещениях стенки $d > \delta$ и значительном уплотнении конструкции, где оболочечная модель уже не позволяет достаточно адекватно описать геометрию деформированных образцов.

Основные энергопоглощающие характеристики образцов приведены в таблице, данные которой показывают, что погрешности определения пиковой ΔP_{\max} и средней ΔP_m силы смятия уменьшаются с ростом отношения стороны сечения образца к его толщине и для $C/s > 30$ не превышают 10 %.

Результаты численного моделирования в сравнении с экспериментальными

s , мм	λ , мм	Эксперимент/Моделирование				Погрешность, %	
		δ , мм	P_{\max} , кН	P_m , кН	$E_{\text{вн}}$, Дж	ΔP_{\max}	ΔP_m
0,8	51	89,3/90,9	7,32/7,10	2,54/2,41	226,8/219,1	-3,0	-5,1
1,2	87	90,2/94,1	13,35/12,97	5,44/4,97	490,7/467,7	-2,8	-8,6
1,6	108	88,0/92,3	21,18/20,08	9,32/8,16	820,2/753,2	-5,2	-12,4
2,0	27	85,3/87,7	30,26/26,22	15,24/12,5	1300,0/1096,3	-13,4	-18,0

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенная оболочечная КЭ-модель небольшой размерности позволяет получать достаточно достоверные результаты в высоконелинейных задачах упруго-пластического смятия тонкостенных конструкций.

Энергопоглощающие характеристики краш-боксов ПУ. К краш-боксам ПУ предъявляется ряд специфических требований, характерных для успешного функционирования комплекса средств приземления возвращаемого аппарата аэрокосмической системы. Во-первых, это ограничение нагрузок, возникающих в процессе его смятия, во-вторых, возможность управления процессом деформирования, так называемая программируемая деформация, необходимая для обеспечения правильной работы при различных начальных условиях удара, в-третьих, необходимость уменьшения риска возможного разрушения конструкции.

Для выполнения этих требований в конструкцию обычных коробчатых энергопоглотителей вводят различные геометрические модификации [15, 16]. Возможный базовый вариант подобной конструкции, удовлетворяющей заявленным требованиям, представлен на рис. 5. Так, конструкция обычной квадратной трубы со стороной

сечения $C = 100$ мм дополнена инициаторами деформаций в виде заранее подготовленных зародышей складок на противоположных гранях. Кроме того, для постепенного увеличения жесткости тонкостенной конструкции и, как следствие, уменьшения пиковых нагрузок при неизменном уровне энергопоглощения введено ступенчатое увеличение толщины от 2,5 мм до 3,0 мм (средняя толщина $s = 2,8$ мм). В дополнение прямые углы исходной конструкции скруглены с радиусом скругления $R = 8$ мм для уменьшения возникающих пластических деформаций и снижения вероятности локального разрушения конструкции [17].

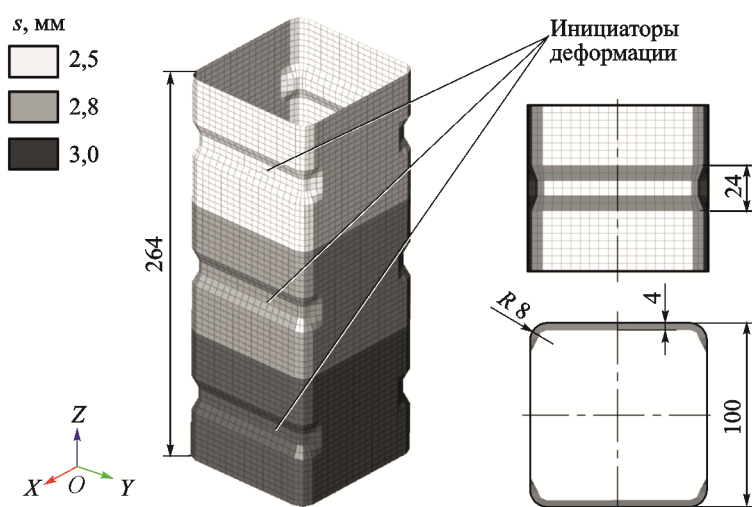


Рис. 5. Расчетная КЭ-модель базового краш-бокса ПУ

Энергопоглощающие характеристики рассматриваемого краш-бокса определяли путем численного моделирования процесса смятия на основе принципов и моделей, описанных ранее. Принятый материал энергопоглотителя — алюминиевый сплав АМг6, имеющий следующие механические характеристики: $E = 69,6$ ГПа, $\nu = 0,32$, $\rho = 2640$ кг/м³, $\sigma_T = 161,9$ МПа [18]. Диаграмма деформирования материала представлена на рис. 6.

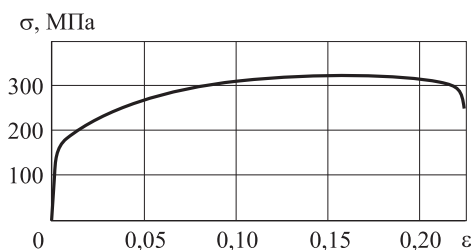


Рис. 6. Инженерная диаграмма деформирования сплава АМг6

Результаты численного моделирования в виде стадий деформирования краш-бокса ПУ представлены на рис. 7. Кривая «усилие — ход» $P(d)$, а также зависимость средней силы смятия P_m от хода d стенки показаны на рис. 8.

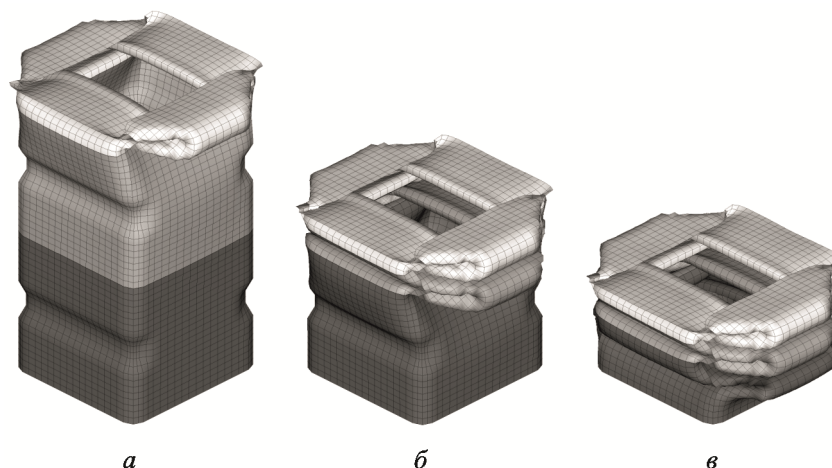


Рис. 7. Характерные стадии деформирования энергопоглотителя ПУ:
а-в — d равен 73,4; 154,6; 200,8 мм соответственно

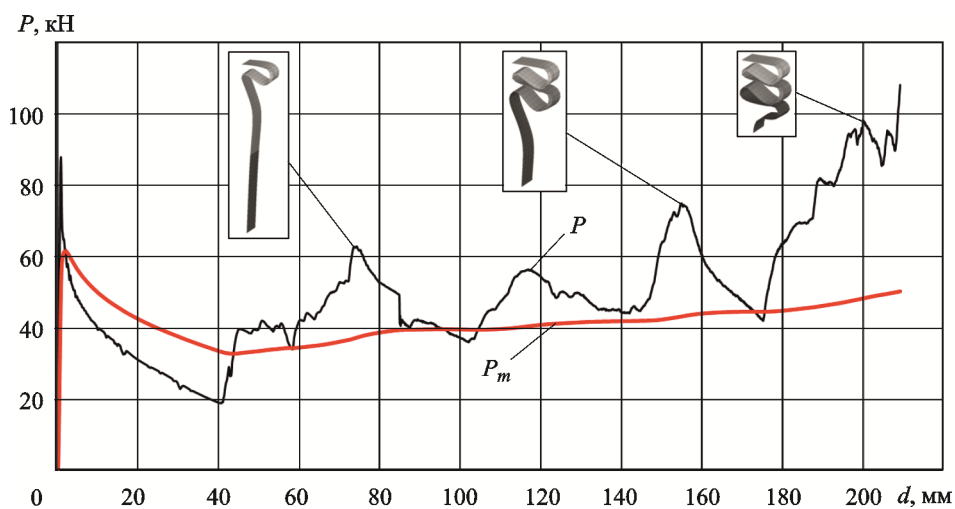


Рис. 8. Зависимости мгновенной P и средней P_m силы смятия энергопоглотителя ПУ от хода стенки d

Основные характеристики базового краш-бокса ПУ из сплава АМгб:

C , мм	s , мм	L , мм	δ , мм	P_{\max} , кН	P_m , кН	$E_{\text{вн}}$, кДж
100	2,8	264	200,8	87,8	48,6	9,76

Заключение. Получены параметры упрощенной оболочечной КЭ модели квадратного тонкостенного образца с использованием программного комплекса MSC Nastran SOL700, обеспечивающие сходимость результатов моделирования упругопластического смятия и натуральных испытаний с погрешностью менее 10 %. С учетом полученных параметров определены характеристики энергопоглощения базового краш-боксов ПУ, необходимые для дальнейшего изучения характеристик перспективного ПУ, в конструкции которого будут применены такие элементы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Abramowicz W. Thin-Walled Structures as Impact Energy Absorbers. *Thin-Walled Struct.*, 2003, vol. 41 (2–3), pp. 91–107.
- [2] Baroutaji A., Sajjia M., Olabi A.G. On the Crashworthiness Performance of Thin-Walled Energy Absorbers: Recent Advances and Future Developments. *Thin-Walled Struct.*, 2017, vol. 118 (9), pp. 137–163.
- [3] Alghamdi A.A.A. Collapsible Impact Energy Absorbers: An Overview. *Thin-Walled Struct.*, 2001, vol. 39 (2), pp. 189–213.
- [4] Airoidi A., Janszen G. A Design Solution for a Crashworthy Landing Gear with a New Triggering Mechanism for the Plastic Collapse of Metallic Tubes. *Aerospace Science and Technology*, 2005, vol. 9 (5), pp. 445–455.
- [5] Johnson W., Walton A.C. An Experimental Investigation of the Energy Dissipation of a Number of Car Bumpers Under Quasi-Static Lateral Loads. *Int. J. Impact. Engng.*, 1983, vol. 1 (3), pp. 301–308.
- [6] Хусаинов А.Ш., Никитин А.Н. Моделирование деформации краш-боксов современных автомобилей. *Вестник УлГТУ*, 2012, № 4 (60), с. 28–32.
- [7] Хусаинов А.Ш., Кузьмин Ю.А. *Пассивная безопасность автомобиля*. Ульяновск, Из-во УлГТУ, 2011, 89 с.
- [8] Щеглов Г.А., Луковкин Р.О. Анализ динамики процесса вертикальной посадки космического аппарата на посадочном устройстве с краш-опорами. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*, 2017, № 3, с. 59–66.
- [9] Луковкин Р.О., Щеглов Г.А. Моделирование процесса посадки космического аппарата на посадочном устройстве с краш-опорами. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2017, № 12, с. 77–87.
- [10] Doelfs P., Neubauer I. *Using MSC. Nastran for Explicit FEM Simulations*. 3. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg 2004. URL: https://www.dynamore.de/en/downloads/papers/04-forum/using-msc.nastran-for-explicit-fem-simulations/at_download/file (дата обращения 05.06.2018).
- [11] Zhang X., Zhang H. Crush Resistance of Square Tubes with Various Thickness Configurations. *Int. J. Mech. Sci.*, 2016, vol. 107, pp. 58–68.
- [12] Du Bois P.A. *Crashworthiness Engineering: Course Notes*. Livermore Software Technology Corporation, 2004.
- [13] Bala S., Day J. *General guidelines for crash analysis in LS-DYNA*. Livermore Software Technology Corporation, 2006. URL: <ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/faq/guidelines.pdf> (дата обращения 05.06.2018).
- [14] Otubushin A. Detailed Validation of a Non-Linear Finite Element Code Using Dynamic Axial Crushing of a Square Tube. *Int. J. Impact. Engng.*, 1998, vol. 21 (5), pp. 349–368.

- [15] Chung Kim Yuen S., Nurick G.N. The Energy-Absorbing Characteristics of Tubular Structures with Geometric and Material Modifications: an Overview. *Applied Mechanics Review*, vol. 61 (2), pp. 020802-1–020802-15.
- [16] Jandaghi Shahi V., Marzbanrad J. Analytical and Experimental Studies on Quasi-Static Axial Crush Behavior of Thin-Walled Tailor-Made Aluminum Tubes. *Thin-Walled Struct.*, 2012. vol. 60, pp. 24–37.
- [17] DiPaolo B.P., Tom J.G. A Study on an Axial Crush Configuration Response of Thin-Wall, Steel Box Components: The Quasi-Static Experiments. *Int. J. Solids Struct.*, 2006, vol. 43 (25–26), pp. 7752–7775.
- [18] Шалина Р.Е., ред. *Авиационные материалы: справочник. В 9 т. Т. 4. Алюминиевые и берилловые сплавы*. Москва, ОНТИ, 1982. 627 с.

Статья поступила в редакцию 13.06.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Луковкин Р.О. Энергопоглощающие характеристики краш-бокса посадочного устройства возвращаемого аппарата. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 10. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-10-1811>

Луковкин Роман Олегович — аспирант кафедры «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: LukovkinRO@ya.ru

Energy-absorbing characteristics of the re-entry vehicle landing gear crash box

© R.O. Lukovkin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article defines energy-absorbing characteristics of the thin-walled energy absorber (crash box) mounted on the advanced landing gear of the aerospace system's re-entry spacecraft. We consider verifying the parameters of the shell-type finite-element model of small dimension in the software package MSC Nastran SOL700. The work simulates a model problem of elasto-plastic crumpling of square aluminum samples of different thickness. We compare the simulation results with the experimental data. It has been established that the suggested mathematical model provides the tolerance of less than 10 percent for the samples having a width-to-thickness ratio $C/s > 30$. Based on the model's verified parameters we have obtained the main energy-absorbing characteristics of the basic square crash box of the landing gear, which was subjected to geometrical modifications in order to improve its damping capabilities. The results obtained can be used for studying the characteristics of the advanced landing gear containing energy-absorbing elements.

Keywords: crash box, energy absorption, MSC Nastran SOL700, landing gear, computational simulation

REFERENCES

- [1] Abramowicz W. Thin-Walled Structures as Impact Energy Absorbers. *Thin-Walled Structures*, 2003, vol. 41 (2–3), pp. 91–107.
- [2] Baroutaji A., Sajjia M., Olabi A.G. On the Crashworthiness Performance of Thin-Walled Energy Absorbers: Recent Advances and Future Developments. *Thin-Walled Structures*, 2017, vol. 118 (9), pp. 137–163.
- [3] Alghamdi A.A.A. Collapsible Impact Energy Absorbers: An Overview. *Thin-Walled Structures*, 2001, vol. 39 (2), pp. 189–213.
- [4] Airoidi A., Janszen G. A Design Solution for a Crashworthy Landing Gear with a New Triggering Mechanism for the Plastic Collapse of Metallic Tubes. *Aerospace Science and Technology*, 2005, vol. 9 (5), pp. 445–455.
- [5] Johnson W., Walton A.C. An Experimental Investigation of the Energy Dissipation of a Number of Car Bumpers under Quasi-Static Lateral Loads. *International Journal of Impact Engineering*, 1983, vol. 1 (3), pp. 301–308.
- [6] Husainov A.Sh., Nikitin A.N. *Vestnik UIGTU (Bulletin of Ulyanovsk State Technical University)*, 2012, no. 4 (60), pp. 28–32.
- [7] Husainov A.Sh., Kuzmin Yu.A. *Passivnaya bezopasnost avtomobilya* [Passive car safety]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University Publ., 2011, 89 p.
- [8] Shcheglov G.A., Lukovkin R.O. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatcionnaya tekhnika — Russian Aeronautics*, 2017, no. 3, pp. 59–66.
- [9] Lukovkin R.O., Shcheglov G.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2017, no. 12, pp. 77–87.
- [10] Doelfs P., Neubauer I. *Using MSC.Nastran for Explicit FEM Simulations*. 3. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg 2004. Available at: https://www.dynamore.de/en/downloads/papers/04-forum/using-msc.nastran-for-explicit-fem-simulations/at_download/file (accessed June 5, 2018).

- [11] Zhang X., Zhang H. Crush Resistance of Square Tubes with Various Thickness Configurations. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, vol. 107, pp. 58–68.
- [12] Du Bois P.A. *Crashworthiness Engineering: Course Notes*. Livermore Software Technology Corporation, 2004.
- [13] Bala S., Day J. *General guidelines for crash analysis in LS-DYNA*. Livermore Software Technology Corporation, 2006. Available at: <ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/faq/guidelines.pdf> (accessed June 5, 2018).
- [14] Otubushin A. Detailed Validation of a Non-Linear Finite Element Code Using Dynamic Axial Crushing of a Square Tube. *International Journal of Impact Engineering*, 1998, vol. 21 (5), pp. 349–368.
- [15] Chung Kim Yuen S., Nurick G.N. The Energy-Absorbing Characteristics of Tubular Structures with Geometric and Material Modifications: an Overview. *Applied Mechanics Review*, vol. 61 (2), pp. 020802-1–020802-15.
- [16] Jandaghi Shahi V., Marzbanrad J. Analytical and Experimental Studies on Quasi-Static Axial Crush Behavior of Thin-Walled Tailor-Made Aluminum Tubes. *Thin-Walled Structures*, 2012, vol. 60, pp. 24–37.
- [17] DiPaolo B.P., Tom J.G. A Study on an Axial Crush Configuration Response of Thin-Wall, Steel Box Components: The Quasi-Static Experiments. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, vol. 43 (25–26), pp. 7752–7775.
- [18] Shalina R.E., ed. *Aviatsionnye materialy: spravochnik. V 9 t. T. 4. Alyuminievye i berillovye splavy* [Aircraft materials: reference book. In 9 volumes. Vol. 4. Aluminium and beryl alloys]. Moscow, ONTI Publ., 1982, 627 p.

Lukovkin R.O., post-graduate, Department of Aerospace Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: LukovkinRO@ya.ru