

УДК 539.3

Л.В. АВТОНОМОВА, С.В. БОНДАРЬ, А.В. СТЕПУК, В.Л.ХАВИН, С.Ю. ШЕРГИН

## УДАРНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТОНКОСТЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Проведено конечноэлементное моделирование процесса ударного деформирования тонкостенной конструкции из алюминиевого сплава при ударе пробойником с конусообразной формой рабочей части. Решение динамической контактной вязкопластической задачи позволило определить поля напряжений и деформаций для конструкции с дополнительным ребром жесткости. Анализ полей деформаций показал, что наличие дополнительного ребра приводит к перераспределению поля напряжений и приводит к увеличению жесткости всей конструкции.

**Ключевые слова:** тонкостенная конструкция, удар, пробойник, контактная задача, метод конечных элементов.

**Введение.** Для препятствия проникновению в различные помещения применяются раздвижные конструкции защитных устройств, качество охранных функций которых зависит от прочности и жесткости их составных звеньев. Как правило, эти звенья сложной конфигурации состоят из пластинчатых элементов, связанных ребрами. При создании надежного качественного защитного устройства прежде всего необходимо обеспечить эффективное сопротивление его элементов ударному воздействию при сохранении функционального назначения. Предварительный прочностной анализ динамической прочности таких пространственных тонкостенных элементов позволяет сделать выбор материала и геометрических параметров и обеспечить рациональное размещение подкрепляющих ребер.

**Анализ последних исследований и литературы.** Исследованиям высокоскоростного ударного деформирования тонкостенных конструкций посвящено много работ [1-4]. Влиянию подкрепляющих ребер на напряженно-деформированное состояние тонкостенных элементов при ударном воздействии посвящены исследования [5-7]. Численно-аналитическими методами решены задачи влияния ребер на жесткость и прочность одномерных и двумерных тел, которые воспринимают динамические сосредоточенные усилия [6]. Численное моделирование процесса деформирования тонких пластин путем удара пробойником с учетом связанности физических полей может быть проведено методом конечных элементов с помощью специализированных программных комплексов [7]. Так в работе [5] представлены результаты конечно-элементного расчета динамической прочности П-образной тонкостенной конструкции, подкрепленной ребрами жесткости при воздействии на нее летящим шаром.

**Целью** данной статьи является численное моделирование процесса деформирования тонкостенной конструкции коробчатого профиля при ударе коническим пробойником и исследование влияния дополнительного ребра жесткости на ее жесткость.

**Постановка задачи.** Математическая модель, которая описывает рассматриваемый процесс, включает следующие уравнения: закон сохранения импульса, закон сохранения энергии (энергетический

баланс), квазистационарные условия пластического деформирования (волновые процессы не учитывались вследствие небольшой скорости удара), условие скольжения (трения) на подвижной границе тел, нелинейные физические соотношения в виде нелинейной зависимости напряжений от скорости деформаций и температуры. Для сжимаемых материалов изменение гидростатического давления учитывается уравнением Грюнайзена, учитывалось условие разрушения. Так же учитывается термо-механическая связь физических процессов.

Для сжимаемых материалов модель Ми-Грюнайзена:

$$\sigma_Y = \sigma_0 C^2 \mu_j \left[ 1 + (1 - \gamma_0 / 2) \mu_j^2 - a \mu_j^2 / 2 \right] / \left[ 1 - (S_1 - 1) \mu_j - S_2 \mu_j^2 / (\mu_j + 1) - S_3 \mu_j^3 / (\mu + 1)^2 \right]^2 + (\gamma_0 + a \mu_j) \cdot E,$$

где  $\sigma_Y$  – интенсивность напряжений,  $\sigma_0$  – начальная интенсивность напряжений,  $\dot{\epsilon}_0$  – начальная скорость деформирования,  $C$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  – константы,  $\gamma_0$  – постоянная Грюнайзена,  $a$  – коррекция объема первого порядка и  $\mu_j = \sigma_Y / \sigma_0 - 1$ .

Момент разрушения оценивается по накоплению деформации в соответствии с

$$\epsilon^f = \left[ D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^* \right] \left[ 1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^* \right] \left[ 1 + D_5 T^* \right],$$

где  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$ ,  $D_5$  – экспериментальные константы,  $\dot{\epsilon}^*$  – скорость деформаций,  $\sigma^*$  – отношение  $\sigma_Y$  к эффективным напряжениям,  $T$  – температура:

$$\sigma^* = \frac{p}{\sigma_{eff}}; \quad \dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}^f}{\dot{\epsilon}_0}$$

разрушение наступает при  $D = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}^p}{\epsilon^f} \geq 1$ .

Численная реализация данной динамической контактной задачи может быть осуществлена методом конечных элементов на базе независимого подхода Лагранжа-Эйлера при помощи численных программных комплексов. Такой подход представляется использованием полностью связанных уравнений движения, связывающих вместе скорости движения как материальных точек, так и узлов КЭ-сетки.

Полное динамическое уравнение равновесия в матричной форме, которое позволяет получить приращения материальных узловых перемещений, скоро-

стей и ускорений за период времени от  $t$  до  $t + \Delta t$  принимает вид:

$$M^L \bar{a} + C^{A1} \bar{v} + C^{A2} (\bar{v} - \bar{v}^g) + K^L \bar{u} + K^A (\bar{u} - \bar{u}^g) = \bar{f} - (M^L + M^A) a + (C^{A1} + C^{A3} + C^{A4}) v|_t.$$

В работе [8] получены матрицы  $M^L$ ,  $M^A$ ,  $C^{A1}$ ,  $C^{A2}$ ,  $C^{A3}$ ,  $C^{A4}$ ,  $K^L$ ,  $K^A$ ,  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{a}$  – приращения векторов материальных узловых перемещений, скоростей и ускорений за отрезок времени от  $t$  до  $t + \Delta t$ ;  $\bar{u}^g$ ,  $\bar{v}^g$  – приращения узловых перемещений и скоростей для независимого движения узлов сетки за отрезок времени от  $t$  до  $t + \Delta t$ ;  $v$ ,  $a$  – значения узловых материальных скоростей и ускорений в момент времени  $t$ ;  $\bar{f}$  – вектор узловых усилий. Для решения нелинейного матричного уравнения используется метод Ньютона-Рафсона. Для интегрирования по времени используется явная схема Неймарка, которая заключается в определении неизвестных приращений переменных и скоростей в момент времени  $t + \Delta t$ .

**Численная реализация и обсуждение результатов.** При решении динамической контактной задачи были получены параметры напряженно-деформированного состояния в тонкостенной конструкции коробчатого профиля алюминиевого сплава при ударе стальным пробойником массой 1кг с конической формой рабочей части (угол атаки 30 град.), который движется со скоростью 5 м/с. На рис. 1 приведена расчетная схема.

В табл. 1 приведены геометрические параметры и физико-механические характеристики стального пробойника и конструкции из алюминиевого сплава. Конечноэлементная модель включает 2290 элементов и 3675 узлов.

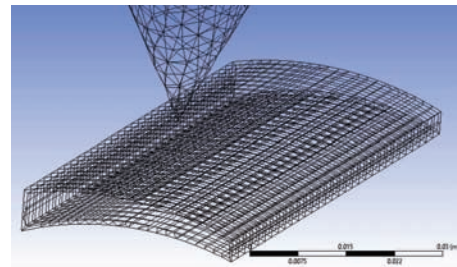


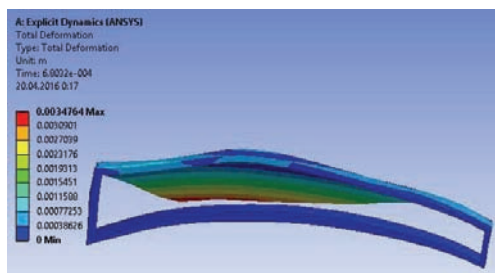
Рисунок 1 – Расчетная схема

Численное моделирование рассматриваемого ударного процесса позволило установить, что для данной геометрии и материала конструкции происходит пластическое деформирование только верхней пластины без разрушения.

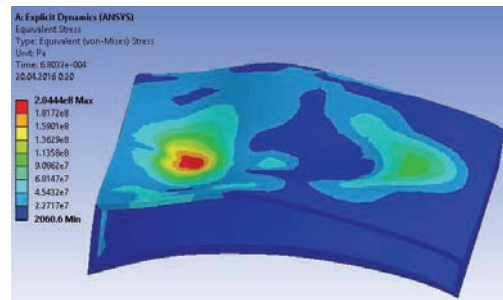
Таблица 1 – Параметры конструкции

Параметр	Сталь	Алюминий
Длина, м	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$
Ширина, м	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$
Высота, м	0,18385	$8,566 \cdot 10^{-3}$
Толщина, м		$1,0 \cdot 10^{-3}$
Плотность, г/м <sup>3</sup>	7826	2710
Модуль упругости, МПа	$2,5 \cdot 10^{11}$	$0,8 \cdot 10^{11}$
Предел прочности, МПа	470	275

На рис. 2 приведено поле распределения перемещений (а) и напряжений (б) в тонкостенной конструкции алюминиевого сплава при ударном воздействии. Максимальное значение перемещений верхней поверхности достигает 0,0035 м, а значения напряжений по Мизесу составляют: максимальное – 204 МПа, минимальное – 22,7 МПа.

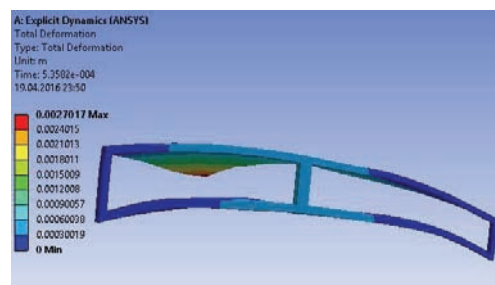


а

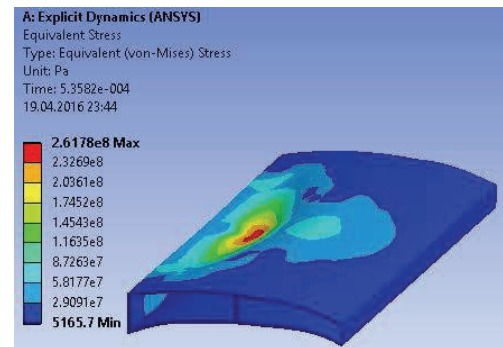


б

Рисунок 2 – Распределение перемещений (а) и напряжений (б) в тонкостенной конструкции при ударном воздействии



а



б

Рисунок 3 – Распределение перемещений (а) и напряжений (б) в тонкостенной конструкции с серединным ребром жесткости при ударном воздействии

На рис. 3 приведено поле распределения перемещений (*a*) и напряжений (*b*) в тонкостенной конструкции коробчатого профиля того же размера с добавленным срединным ребром жесткости при ударе пробойника в точке с теми же координатами. Максимальное значение перемещений верхней поверхности снизилось до 0,0027 м, а максимальное значение напряжений по Мизесу составило 262 МПа.

Анализ напряженно-деформированного состояния при ударном взаимодействии с пробойником при скорости движения 5 м/с на тонкостенную конструкцию показал, что наличие добавочного срединного ребра увеличивает контактную жесткость всей конструкции в четыре раза и существенно уменьшает область пластического деформирования.

**Выводы.** Исследовано ударное взаимодействие пробойника с конусообразной формой рабочей части с тонкостенной коробчатой конструкцией изготовленной из алюминиевого сплава. Численное моделирование ударного процесса проведено с помощью метода конечных элементов на базе независимого подхода Лагранжа-Эйлера для двух вариантов тонкостенной коробчатой конструкции. Анализ прочности тонкостенной конструкции коробчатого профиля из алюминиевого сплава при ударном воздействии пробойником значительной массы показал, что при введении дополнительного срединного ребра в конструкцию, позволило изменить жесткость этой конструкции и улучшить прочностные свойства всего составного защитного устройства, элементами которого она является.

**Список литературы:** 1. Абросимов Н.А. Исследование динамического деформирования упругопластических сферических оболочек при тепловом ударе / Н.А. Абросимов, В.Г. Баженов // Изв. АН СССР. МТТ. – 1978. – № 1. – С. 139-143. 2. 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. 3. Воробьев Ю.С. Скоростное деформирование элементов конструкций в упругопластической стадии / Ю.С. Воробьев, М. В. Чернобрышко // Проблемы чис-

ловальной механики и прочности конструкций. – 2010. – Вып. 14. – С. 87-92. 4. Бизюк А.В. Скоростной удар по тонкостенным конструкциям / А.В. Бизюк, В.В. Бизюк, А.В. Колодязный // Вестник ХНУ ХПИ. – 2007. – № 775. – С. 29-35. 5. 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. 6. 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. 7. Степук О. В. Особливості деформування П-подібної тонкостінної конструкції при ударі / О. В. Степук, Л. В. Автономова, С. В. Бондарь // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 37. – С. 193-199. 8. Bayoumi H. N. Arbitrary Lagrangian-Eulerian formulation for quasi-static and dynamic metal forming simulation / H. N. Bayoumi. – PhD. Dissertation. – University of British Columbia. – 2001. – 128 p.

**Bibliography (transliterated):** 1. Abrosimov N.A., Bazhenov V.G. Issledovanie dinamicheskogo deformirovaniya uprugoplasticheskikh sfericheskikh obolochek pri teplovom udare. Izv. AN SSSR. MTT. 1978, No 1, pp. 139-143. 2. Bazhenov V.G., Batanin M.A. Issledovanie uprugoplasticheskikh processov deformatsii kruglykh plastin pri impul'snom nagruzenii s uchetom bol'shikh progibov. Prikl. mehanika, 1978, No 3, pp. 74-78. 3. Vorob'ev Ju., Chernobryko V. Skorostnoe deformirovanie jelementov konstrukcij v uprugoplasticheskoy stadii. Problemy obchyslyval'noyi mekhaniki i mitsnosti konstruktсий. 2010, vol. 14, pp. 87-92. 4. Bizjuk A.V., Bizjuk V.V., Kolodjazhnyj A.V. Skorostnoj udar po tonkostennym konstrukcijam. Vestnik HNU "KhPI", 2007, No 775, pp. 29-35. 5. Avtomonova L. V., Bondar' S. V., Stepuk A. V. Deformirovanie P-obraznoj tonkostennoj konstrukcii s rebrami zhestkosti pri udare sharom. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Matematychnе modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh. Kharkiv: NTU "KhPI", 2014, No 6 (1049), pp. 3-8. 6. Dmitrieva L. M. Plastinki i obolochki, podkreplennye rebrami zhestkosti, pod dejstviem lokal'nyh dinamicheskikh nagruzok. Issledovanija po teorii plastin i obolochek, 1976, No 12, pp. 172-187. 7. Stepuk O. V., Avtomonova L. V., Bondar S. V. Osoblyvosti deformuvannya P-podibnoyi tonkostinnoyi konstruktсийi pry udari. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Matematychnе modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh. Kharkiv: NTU "KhPI", 2013, No 37, pp. 193-199. 8. Bayoumi H. N. Arbitrary Lagrangian-Eulerian formulation for quasi-static and dynamic metal forming simulation. PhD. Dissertation. University of British Columbia, 2001, 128 p.

Поступила (received) 03.06.2016

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Автономова Людмила Владимировна** – канд. техн. наук, вед. научн. сотр., Национальный технический университет «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com

**Autonomova Ludmila** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Leading Researcher, National Technical University "KhPI", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com

**Бондарь Сергей Владимирович** – канд. техн. наук, ст. научн. сотр., Национальный технический университет «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: serg\_xpi@mail.ru

**Bondar Sergiy** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, National Technical University "KhPI", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: serg\_xpi@mail.ru

**Степук Александр Владимирович** – канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр., Национальный технический университет «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: abtop@yahoo.com

**Stepuk Alexander** – Candidate of Physics -Mathematical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, National Technical University "KhPI", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: abtop@yahoo.com

**Хавин Валерий Львович** – канд. техн. наук, зав. каф., Национальный технический университет «ХПИ», тел.: (057)-70-761-78, e-mail: Vkhavin@kpi.kharkov.ua

**Khavin Valeriy** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of Department, National Technical University "KhPI", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: Vkhavin@kpi.kharkov.ua

**Шергин Сергей Юрьевич** – ст. преп., Национальный технический университет «ХПИ», тел.: 70-761-78, e-mail: Sshergin@kpi.kharkov.ua

**Shergin Sergei** – Senior Lecturer, National Technical University "KhPI", tel.: (057)-70-761-78, e-mail: Sshergin@kpi.kharkov.ua