УДК 534.1:539.3

Ю. С. ВОРОБЬЕВ, Н. Ю. ОВЧАРОВА

СКОРОСТНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ КОНТАКТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Цель работы – анализ процессов скоростного деформирования многослойных элементов в упругопластической стадии при контактном ударном воздействии. Рассматривается элемент, состоящий из двух тонких слоев титанового сплава и внутреннего керамического слоя. Ударник моделируется как упругопластическое тело. При локальном ударном воздействии происходит переменное по пространственной и временной координатам деформирование в ограниченной области. Поэтому каждый слой элемента рассматривается в трехмерной постановке. При моделировании используется динамический вариант деформационной теории пластичности, в которой учитываются зависимости интенсивностей напряжений от интенсивностей деформаций и их скоростей. При этом учитываются динамические свойства различных материалов каждого слоя. Проблема является геометрически и физически нелинейной. С помощью метода конечных элементов выявляются особенности динамического напряженно-деформированного состояния всех слоев элемента. Результаты используются для повышения динамической прочности защитных элементов.

Мета роботи – аналіз процесів швидкісного деформування багатошарових елементів у пружнопластичній стадії при контактному ударному навантаженні. Розглядається елемент, що складається з двох тонких шарів титанового сплаву і внутрішнього керамічного шару. Ударник моделюється як пружнопластичне тіло. При локальному ударному навантаженні відбувається змінне по просторовій і часовій координатах деформування в обмеженій області. Тому кожен шар елемента розглядається в тривимірній постановці. При моделюванні використовується динамічний варіант деформаційної теорії пластичності, в якій враховуються залежності інтенсивностей напружень від інтенсивностей деформацій та їх швидкостей. При цьому враховуються динамічні властивості різних матеріалів кожного шару. Проблема є геометрично і фізично нелінійною. За допомогою методу скінченних елементів виявляються особливості динамічного напружено-деформованого стану всіх шарів елемента. Результати використовуються для підвищення динамічної міцності захисних елементів.

The work purpose is to analyze high-speed straining the sandwich members at the elastoplastic stage under contact impacts. The member consisting of two thin layers from the titanium alloy and the inner ceramic layer is examined. The impactor is modeled as an elastoplastic body. The local impact results in variable straining by the time and spatial coordinates in a limited region Thus, each layer of the member is examined in the 3D statement. The simulation uses a dynamic version of the straining theory of plasticity, which takes into account the dependences of the stress intensities on the strain intensities and their rates. In so doing the dynamic properties of different materials for each layer are considered. The problem is a geometrically and physically nonlinear. The special features of the dynamic stress-strain state of all layers of the member are revealed using the finite element method. The results are used to improve the dynamic strength of the protective members.

Ключевые слова: *скоростное деформирование, упруго-пластические деформации, контактное ударное воздействие, трехмерные модели, многослойный элемент, численный анализ.*

Введение. В современной технике большую роль играют контактные взаимодействия конструктивных элементов. Анализу этой проблемы посвящены многие фундаментальные исследования [1 – 5]. Многие современные конструкции испытывают динамическое контактное воздействие [3 – 7]. Такие нагрузки действуют на защитные боксы, элементы энергетических систем, авиационной, космической, транспортной и военной техники. Практика показывает, что многослойные конструкции наиболее эффективно противостоят ударным локальным нагрузкам. При интенсивных ударных нагрузках возникают упругопластические деформации. Даже в сравнительно тонкостенных элементах конструкций при локальных ударных нагрузках возникает трехмерное динамическое напряженно-деформированное состояние. Поэтому используются трехмерные модели с учетом динамических свойств материала, которые определяются на основе экспериментальных исследований. Учет конечных перемещений и деформаций приводит к геометрической нелинейности задачи. Так как уравнения состояния отражают упрогопластическую стадию деформирова-

© Ю. С. Воробьев, Н. Ю. Овчарова, 2016

ния и динамических свойств материала, то задача является также и физически нелинейной. Задача решается вариантом метода конечных элементов, который учитывает специфику рассматриваемого процесса. Важным требованием к выбору типа конечных элементов является учет всех указанных факторов. Граничные условия в узлах элементов должны удовлетворять равенству как перемещений, так и их производных. Функции форм при этом позволяют описывать непрерывное и гладкое изменение напряжений.

В работах [8, 9] рассматривалось воздействие ударника на пластины из различных материалов, а в работах [9, 10] – воздействие ударника на цилиндрические конструкции. Целью данной работы является анализ процессов скоростного деформирования многослойных элементов в упругопластической стадии при контактном ударном воздействии.

Проведены численные исследования динамического напряженно-деформированного состояния многослойных элементов ряда конструкций под действием ударников с различными скоростями.

Зона развития интенсивных напряжений при ударных нагрузках является весьма ограниченной [8 – 10]. Напряжения быстро затухают во времени и на расстояниях, примерно в пять – десять раз превышающих размеры зоны приложения нагрузки. Поэтому, когда в результате численного анализа выявлена зона интенсивных напряжений, происходит выделение области элемента конструкции, представляющей интерес. В этой области может быть использована более густая сетка конечных элементов. Такой подход позволяет дать более точную оценку распределения наибольших перемещений и напряжений с большими градиентами. При необходимости процесс сгущения сетки в наиболее интересующей исследование области может быть продолжен.

Показаны особенности распределения и локализации интенсивностей напряжений и перемещений в ограниченной области удара. Отмечается целесообразность использования многослойных защитных конструкций с использованием керамики.

Результаты исследований позволяют дать практические рекомендации по снижению уровня динамических напряжений и повышению динамической прочности защитных элементов конструкций.

Постановка задачи. Рассматривается ударное воздействие на многослойный элемент, состоящий из двух тонких слоев из титанового сплава и внутреннего керамического слоя. Процессы скоростного деформирования каждого слоя рассматриваются на основе трехмерных моделей. При этом используется динамический вариант теории пластических деформаций с учетом динамических свойств материла. Формирование модели происходит с учетом результатов работ [3, 4, 6]. Зависимости между напряжениями и деформациями для каждого слоя в системе координат *xyz* при этом имеют вид:

$$
\begin{aligned}
\sigma_x - \sigma_0 &= \frac{1}{\psi}\left(\varepsilon_x - \frac{1}{3}\varepsilon_0\right), & \tau_{xy} &= \frac{1}{2\psi}\gamma_{xy}, \\
\sigma_y - \sigma_0 &= \frac{1}{\psi}\left(\varepsilon_y - \frac{1}{3}\varepsilon_0\right), & \tau_{yz} &= \frac{1}{2\psi}\gamma_{yz}, \qquad (1) \\
\sigma_z - \sigma_0 &= \frac{1}{\psi}\left(\varepsilon_z - \frac{1}{3}\varepsilon_0\right), & \tau_{xz} &= \frac{1}{2\psi}\gamma_{xz},
\end{aligned}
$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – компоненты нормальных напряжений; $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ – компоненты касательных напряжений; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – компоненты нормальных деформаций; $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ – компоненты касательных деформаций

$$\sigma_0 = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z), \tag{2}$$
$$\varepsilon_0 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z .$$

В случае упругих деформаций $\psi = \frac{1}{2\mu}$, где μ – параметр Ляме, и зависимости (1) переходят в закон Гука. В случае пластических скоростных деформаций $\psi = \frac{3}{2}\frac{\varepsilon_i}{\sigma_i}$.

Динамическое упрочнение материалов отражает зависимости интенсивностей напряжений от интенсивностей деформаций и скоростей деформаций $\sigma_i = \sigma_i\left(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i\right)$ [2, 3]. В данном случае используются зависимости типа Пэжины [7]

$$\sigma_i = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i^{pl}}{\gamma}\right)^m\right] E \cdot \varepsilon_i , \tag{3}$$

где E – модуль упругости; m и γ – коэффициенты чувствительности к скорости деформации; $\dot{\varepsilon}_i^{pl}$ – скорость деформации в пластической стадии.

Зависимости напряжений от деформаций (1), (2), (3) приводят к физической нелинейности задачи. Зависимости для конечных перемещений и деформаций определяют геометрическую нелинейность задачи.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\right),$$
$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2}\left(\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right),$$
$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{2}\left(\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right), \tag{4}$$
$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial w}{\partial x}\right),$$
$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z}\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\frac{\partial w}{\partial y}\right),$$
$$\gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z}\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z}\frac{\partial w}{\partial x}\right),$$

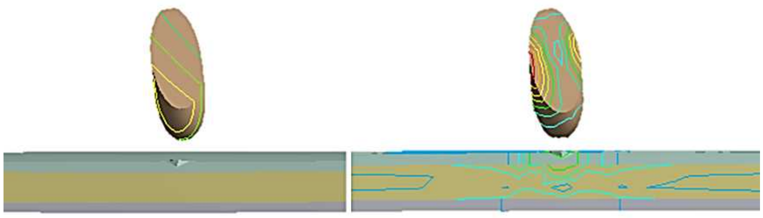
где u, v, w – перемещения в системе координат xyz.

Ударник моделируется как упругопластическое тело. Зависимости (1) – (4) позволяют решать задачи в перемещениях, что используется в методе конечных элементов.

Численный анализ. Рассматривается трехслойный элемент длиной a = 100 мм и шириной b = 100 мм; слои, выполненные из титанового сплава Ti6Al4V, имеют одинаковую толщину $h_1 = h_3 = 2$ мм; толщина внутреннего керамического слоя $h_2 = 3{,}2$ мм. Основные механические свойства титанового сплава следующие: плотность $\rho = 4420$ кг/м^3; модуль упругости $E = 1{,}19\cdot10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}342$; предел упругости $\sigma_T = 9{,}1\cdot10^8$ Па. Механические свойства керамики: плотность $\rho = 4900$ кг/м^3; модуль упругости $E = 6{,}32\cdot10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}204$. Механические свойства стального ударника массой m = 0,1 кг: $\rho = 7800$ кг/м^3, модуль упругости $E = 2{,}06\cdot10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}3$; предел упругости $\sigma_T = 2{,}99\cdot10^8$ Па, модуль упрочнения $E_1 = 7{,}39\cdot10^8$ Па.

На рис. 1 показано напряженно-деформированное состояние пластины и ударника через $3\cdot10^{-4}$ с после контакта при скорости соударения 150 м/с. При этом процесс скоростного деформирования происходит в основном в упругой стадии. После отскока ударника напряжения и деформации распространяются по всей толщине элемента. Напряжения при этом в пластине не превышают 310 МПа. В месте контакта напряжения достигают 450 МПа.

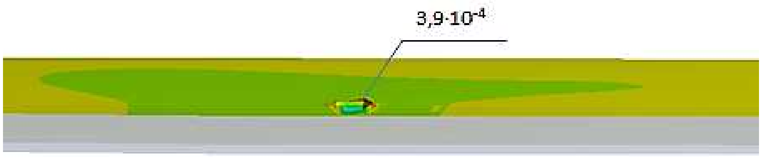
На рис. 2 представлено распределение деформаций в различных слоях защитного элемента. При увеличении скорости удара до 200 м/с происходят небольшие повреждения первого слоя из титанового сплава (рис. 2, а)), но максимальные деформации локализованы в ограниченной области повреждения. Значительные деформации возникают в обширной зоне среднего керамического слоя (рис. 2, б)). Это показывает, что средний слой поглощает значительную долю энергии деформации. Третий слой ограничивает деформации и перемещения среднего слоя (рис. 2, в)).



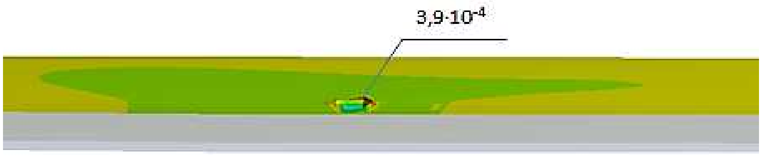
а) б)

Рис. 1 – Деформации (а) и эквивалентные напряжения (б) в трехслойной пластине при воздействии ударника со скоростью 150 м/с через $3\cdot10^{-4}$ с после контакта

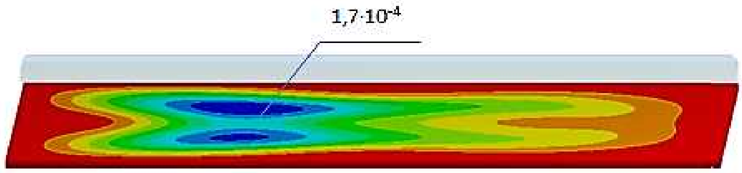
Максимальные напряжения в первом слое достигают предела упругости. Максимальные деформации в слоях элемента, указанные на рис. 2 являются безразмерными величинами.



а)



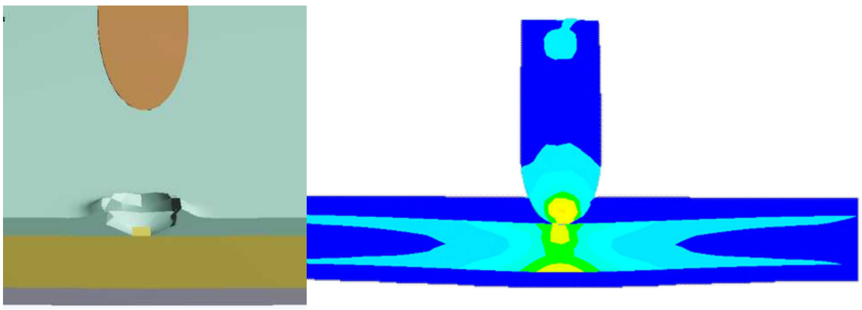
б)



в)

Рис. 2 – Распределение безразмерных деформаций в верхнем титановом слое (а), среднем керамическом (б) и нижнем титановом слое (в) в трехслойной пластине при воздействии ударника со скоростью 200 м/с через $3\cdot10^{-4}$ с после контакта

При воздействии ударника со скоростью 400 м/с возникают значительные повреждения верхнего слоя из титанового сплава в виде кратера, окаймленного кольцевым выступом (рис. 3, а)). При этом напряжения в верхнем слое из титанового сплава превышают предел прочности в локальной зоне и достигают 1330 МПа (рис. 3, б)).



а) б)

Рис. 3 – Деформации (а) и эквивалентные напряжения (б) в трехслойной пластине при воздействии ударника со скоростью 400 м/с через $3\cdot10^{-4}$ с после контакта

В керамическом слое в ограниченной области также возникают напряжения, превышающие предел прочности, и достигают 925 МПа. Однако практически весь объем среднего слоя остается в упругой области. Также в упругой области остается нижний слой из титанового сплава. При дальнейшем увеличении скорости соударения увеличивается размер кратера, но средний слой и тем более нижний сохраняют свои защитные свойства.

На рис. 4 показано напряженное состояние элемента при воздействии ударника со скоростью 600 м/с.

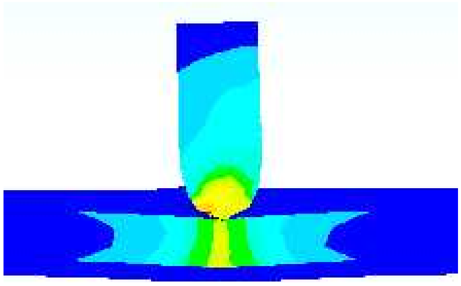


Рис. 4 – Напряженное состояние в трехслойной пластине при воздействии ударника со скоростью 600 м/с через $1 \cdot 10^{-4}$ с после контакта

Видно проникновение ударника вплоть до керамического слоя. В керамическом слое происходит разрушение вдоль ограниченной вертикальной области. Следует отметить, что в среднем керамическом слое возникают наиболее обширные области деформации, что способствует поглощению энергии удара. В металлическом слое из титанового сплава при образовании кратера максимальные напряжения возникают только в весьма локальной зоне.

На рис. 5 показаны зависимости максимальных динамических напряжений в верхнем слое из титана (пунктирная линия) и в керамическом слое (сплошная линия). Видна тенденция более быстрого роста напряжений в керамическом слое. С ростом скорости соударения происходит динамическое упрочнение материала и рост сопротивляемости элементов ударным нагрузкам, что соответствует общей тенденции сопротивляемости материалов ударным нагрузкам при росте скорости деформации [11].

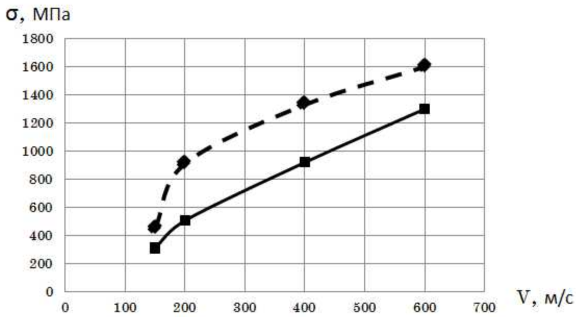


Рис. 5 – Зависимости максимальных динамических напряжений в верхнем слое из титана (пунктирная линия) и в керамическом слое (сплошная линия) от скорости воздействия ударника.

Выводы. В предыдущих исследованиях было показано, что двухслойные элементы лучше сопротивляются ударным нагрузкам, чем однослойные из тех же материалов даже с большей толщиной [8 – 10]. При этом титановые сплавы обладают хорошей сопротивляемостью к ударным нагрузкам, которая растет со скоростью деформации [11]. Поэтому в данной работе рассмотрена сопротивляемость трехслойного элемента из двух тонких слоев титанового сплава и среднего керамического слоя. Видно, что трехслойная конструкция хорошо сопротивляется ударным нагрузкам, даже при повреждениях верхнего слоя в среднем слое развиваются основные деформации, которые ограничиваются нижним слоем. Таким образом, средний слой поглощает основную энергию удара и увеличивает сопротивление элемента локальным ударным нагрузкам. При увеличении скорости удара в верхнем слое возникают повреждения в виде кратера, но, несмотря на это, трехслойный элемент сохраняет свои защитные свойства. Таким образом, трехслойные элементы обеспечивают необходимую динамическую прочность конструкции.

1 *Мосаковский В. И.* Контактное взаимодействие элементов оболочечных конструкций / *В. И. Мосаковский, В. С. Гудрамович, Е. М. Макеев.* – Киев : Наук. думка, 1988. – 288 с.
2. *Галин Л. А.* Контактные задачи упругости и вязкупругости / *Л. А. Галин.* – М. : Наука, 1980. – 304 с.
3. *Степанов Г. В.* Упругопластическое деформирование материалов под действием импульсных загрузок / *Г. В. Степанов* – Киев : Наук. думка, 1979. – 266 с.
4. *Кукуджанов В. Н.* Численное моделирование динамических процессов деформирования и разрушения / *В. Н. Кукуджанов* // Успехи механики. – 1985. – Т. 8, № 4. – С. 2 – 55.
5. *Гольдсмит В.* Удар / *В. Гольдсмит.* – М. : Госстройиздат, 1965. – 447 с.
6. *Воробьев Ю. С.* Скоростное деформирование элементов конструкций / *Ю. С. Воробьев, А. В. Колодяжный, В. И. Севрюков, Е. Г. Янютин.* – Киев : Наукова думка,1989. – 148 с.
7. *Meyers. M. A.* Dynamics behavior of materials / *M. A. Meyers.* – Wiley, New York, 1994.
8. *Воробьев Ю. С.* Динамика элементов конструкций при ударных нагрузках / *Ю. С. Воробьев, Н. Ю. Овчарова* // Вибрации в технике и технологиях. – 2014. – № 2(74). – С. 5 – 11.
9. *Воробьев Ю. С.* Влияние динамических свойств материала на скоростное деформирование элементов конструкций / *Ю. С. Воробьев, Н. Ю. Овчарова* // Вісник Запорізького національного університету. Математичне моделювання і прикладна механіка. – 2015. – №1. – С. 12 – 22.
10. *Vorobiov Iu. S.* FEM Analysis of Cylindrical Structural Elements under Local Shock Loading / *Iu. S. Vorobiov, L. Kruszka , N. Y. Ovcharova* // Applied Mechanics and Materials Trans Tech Publications, Switzerland. – 2014 . – Vol. 566. – P. 499 – 504.
11. Ударно волновые явления в конденсированных средах / *Г. И. Канель, С. В. Разоренов, А. В. Уткин, В. Е. Фортов.* – М. : Янус К. – 1996. – 488 с.

Институт проблем машиностроения
им. А. Н. Подгорного
Национальной академии наук Украины,
Харьков

Получено 21.07.2016,
в окончательном варианте 22.09.2016