

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДВУХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПРОБОЙНИКОМ

У роботі методом скінченних елементів проведено чисельне моделювання процесу ударної взаємодії двошарової пластини (метал - біотканина) со сталевим пробійником. Рішення нестационарної контактної крайової термовязкопружньопластичної задачі дозволило знайти параметри напружений-деформованого стану в шарах пластини. Аналіз полів деформацій і напружень показав, що при неповному проникненні пробійника в пластину область деформації шару біотканини значно перевищує область локальної деформації металевого шару.

Ключові слова: удар, двошарова пластина, біотканина, моделювання, термовязкопружньопластичність, метод скінченних елементів.

В работе методом конечных элементов проведено численное моделирование процесса ударного взаимодействия двухслойной пластины (металл - биоткань) со стальным пробойником. Решение нестационарной контактной крайовой термовязкоупругоупругоэластической задачи позволило найти параметры напряженно-деформированного состояния в слоях пластины. Анализ полей деформаций и напряжений показал, что при неполном проникновении пробойника в пластину область деформирования слоя биоткани значительно превышает область локального деформирования металлического слоя.

Ключевые слова: удар, двухслойная пластина, биоткань, моделирование, термовязкоупругоупругоэластичность, метод конечных элементов.

The numeral simulation of double-layer plate (metal and bio-tissue) deform process under steel punch impact is provided applying the method of finite elements. The solution of non-stationary thermos viscous elastic boundary value problem allowed to find out the parameters of the stress-strain deformed state within the layers of the plate. The analysis of the strain fields and stresses demonstrated that the deformation area of bio-tissue layers considerably exceeds the area of metallic local deformation during the incomplete punch penetration into a plate. The maximum displacement in the bio-tissue layer does not exceed the critical depth of the dent in the metal layer.

Keywords: impact, double-layer plate, bio-tissue, simulation, thermos viscous elasticity, finite element method.

Введение. Основными критериями при выборе защитной конструкции с пластинчатыми бронезэлементами является защита от всех видов пробоя, охват большой площади защиты и минимальный вес. Пластинчатые элементы защитной конструкции также должны обеспечить минимальное запреградное действие на объект, которое оценивают по глубине вмятины при изгибе пластины после удара пробойником. Статистика, собранная специалистами, показывает, что при глубине вмятины 22 мм после удара возникают тяжелые запреградные травмы. Поэтому, при изготовлении различных защитных пластин (стальных, многослойных, керамических) проводятся как экспериментальное исследования, так и численное моделирование процессов разрушения и проникновения пробойника в преграду после удара.

Анализ последних исследований и литературы. В последние годы появилось много работ, посвященных моделированию деформирования и разрушения биоткани при ударном воздействии. Так была разработана теории Мартеля о связи нанесенного повреждения и освободившейся энергии. В работе [1] предполагается, что размер разрушенной области биоткани прямо пропорционален рассеиваемой энергии. На основании анализа ряда экспериментов с биообъектами была доказана корреляция между количеством разрушенной биоткани и рассеянной кинетической энергией пробойника [2]. В работе [3] при выводе уравнения пороговой скорости пули было учтено, что

проницаемость кожи зависит прежде всего от плотности сечения S снаряда (S – масса, деленная на площадь поперечного сечения пули). Исследованию пробивания кости пулей посвящена работа [4]. Кость не эластична и имеет большую плотность с удельным весом 1.11, а также большую прочность, чем окружающая мышечная ткань. Как прямой удар, так и кавитационное давление могут привести к разрушению кости. При прямом попадании пуля сначала создает временную полость при входе в мягкую ткань перед костью. Затем пуля разрушает кость, и давление будет проталкивать часть кости в осевом направлении наружу, создавая временную полость кости. Исследованию запреградного действия при ударе на биообъект посвящена работа [5]. Быстрая акустическая ударная волна и более медленная волна давления, создаваемая движением кавитирующих тканей при ударе без разрушения защитной пластины, могут создавать давление 34 МПа в биоткани и вызывать вредные эффекты в биообъекте. Поэтому при проектировании пластинчатых защитных конструкций необходимо анализировать процесс взаимного деформирования система защиты-биоткань при полном и частичном проникновении пробойника после удара.

Целью данной работы является численное моделирование процесса частичного проникновения пробойника в двухслойную пластину (металл - биоткань) и определение распределения их параметров напряженно-деформированного состояния при ударе.

Постановка задачі. Математическое моделирование процесса совместного деформирования или разрушения пластинчатого элемента защитной конструкции и присоединенной массой биоткани при ударе пробойником осуществляется с помощью решения динамической контактной задачи деформирования двухслойной пластины (металл-биоткань). При ударе пробойником может происходить изгиб или разрушение двухслойной пластины в окрестности его контакта с пластиной. При сквозном проникновении пробойника наблюдается разрушение как металлического слоя пластины, так и слоя биоткани. При частичном проникновении может происходить изгиб и поверхностное разрушение металлического слоя без разрушения слоя биоткани.

Математическая модель, которая описывает процесс ударного взаимодействия двухслойной пластины при частичном проникновении пробойника в пластину, включает в общем случае следующие уравнения [6]:

– уравнение движения:

$$\sigma_{ij,j} + \rho \cdot dv_i / dt = 0, \quad (1)$$

– кинематические соотношения:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = (v_{ij} + v_{ji}) / 2, \quad (2)$$

– физические уравнения в скоростной форме:

$$\sigma_{ij}^T = C_{ijkl} D_{kl}, \quad (3)$$

где σ_{ij}^T – компоненты тензора скоростей напряжения, C_{ijkl} – компоненты упруго-пластического тензора связи напряжений-деформаций 4-го порядка, D_{kl} – компоненты тензора скоростей деформаций;

– условие несжимаемости: $v_{ii} = 0$;

– определяющие соотношения, которые устанавливают связь интенсивности напряжений σ_y от деформаций ϵ_i , скорости деформаций $\dot{\epsilon}_{ij}$ и температуры T :

$$\sigma_y = \sigma_y(\bar{\epsilon}^p, \dot{\bar{\epsilon}}^p, T). \quad (4)$$

Биоткани нередко имеют различные значения характеристик прочности материала при растяжении и при сжатии, поэтому в качестве определяющих соотношений можно использовать модель Грюнайзена, которая включает различные соотношения в зависимости от того, расширяется или сжимается материал. Для сжимаемых материалов:

$$\sigma_y = \sigma_0 C^2 \mu_j \left[1 + (1 - \gamma_0 / 2) \mu_j^2 - a \mu_j^2 / 2 \right] / \left[1 - (S_1 - 1) \mu_j - S_2 \mu_j^2 / (\mu_j + 1) - S_3 \mu_j^3 / (\mu_j + 1)^2 \right]^2 + (\gamma_0 + a \mu_j) \cdot E, \quad (5)$$

для расширяющихся материалов:

$$\sigma_y = \sigma_0 C^2 \mu_j + (\gamma_0 + a \mu_j) \cdot E, \quad (6)$$

где C , S_1 , S_2 и S_3 – константы, γ_0 – постоянная Грюнайзена, a – коррекция объема первого порядка и $\mu_j = \sigma_y / \sigma_0 - 1$.

Уравнение теплопроводности:

$$\rho c T = k_1 T_{ij} + \beta \sigma \dot{\epsilon}. \quad (7)$$

При выборе критерия прочности биоткани необходимо также учитывать анизотропию характеристик материала при растяжении и при сжатии, зависимость свойств материала от гидростатического давления и

наличие экспериментальных данных. Т.к. верхний слой пластины (металл) изотропный и более прочный, то разрушение двухслойной пластины при частичном проникновении пробойника при ударе начинается с разрушения этого слоя и связей между слоями. Поэтому для металлического слоя выбирается критерий прочности Друкера-Прагера в виде:

$$\sqrt{J_2} = A + B J_1, \quad (8)$$

где J_1 – первый инвариант тензора напряжений, а J_2 – второй инвариант девиатора тензора напряжений. Константы A , B определяются экспериментально.

Для решения динамической краевой задачи задаются граничные и начальные условия. Начальные условия для взаимодействующих пластины и пробойника задаются исходя из того, что пластина находится в покое, а пробойник движется с некоторой начальной скоростью. Угол атаки пробойника при встрече с пластиной равен нулю.

Граничные условия задавались на свободных поверхностях пластины и пробойника, где нормальные и касательные составляющие напряжений считались равными нулю. В зоне контакта при соударении пробойника с пластиной выполняется условие проскальзывания. На контактной границе слоев с различными характеристиками свойств материала должно выполняться проскальзывание с незначительным трением. Начальная температура равна температуре окружающей среды.

Численная реализация. Для численного определения параметров напряженно-деформированного состояния при ударном взаимодействии двухслойной пластины и пробойника решается краевая нестационарная контактная задача термоупругопластичности методом конечных элементов. Для оптимизации вычислительного процесса выбран независимый подход Лагранжа-Эйлера, при использовании которого движение конечно-элементной сетки задается независимо и определяется процессом деформирования материала.

На рис. 1 представлена расчетная схема ударного нагружения двухслойной пластины стальным пробойником (вес 8.62 г, высота – 20 мм, диаметр – 5 мм), который движется с начальной скоростью 400 м/с.

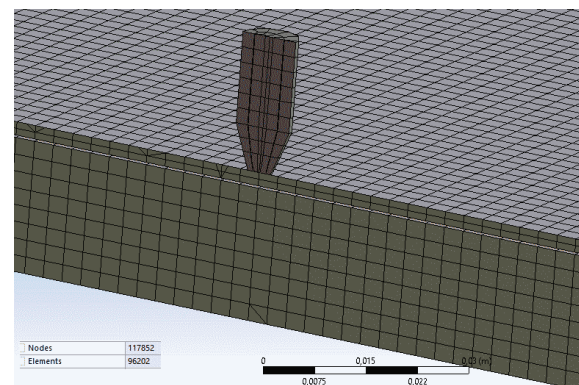


Рисунок 1 – Схема ударного нагружения двухслойной пластины

Пластина состоит из верхнего металлического слоя толщиной 7 мм с физико-механическими свойствами материала: плотность $\rho = 7,85 \text{ г/см}^3$, модуль объемного сжатия $K = 175 \text{ ГПа}$, модуль сдвига $G = 80 \text{ ГПа}$, динамический предел текучести $Y = 0,4 \text{ ГПа}$. Для нижнего слоя пластины (толщина 20 мм) выбрана биоткань с усредненными характеристиками: модуль упругости $E_B = 0,01 \text{ МПа}$, предел прочности равен 40 МПа, деформация при разрыве составляет 150-200 %. На контактной поверхности между слоями пластины выполняются условия скольжения с трением (коэффициент трения равен 0,1).

Конечно-элементная модель пластины состоит из 9622 элементов и 117652 узла. Модель материала для верхнего металлического слоя задается экспериментально полученным семейством кривых деформирования в широком диапазоне скоростей деформаций и температур. Для нижнего слоя биоткани задается зависимость связи интенсивности напряжений σ_Y от деформаций ε_i . Численные результаты расчета были получены при помощи специализированного программного комплекса ANSYS.

Обсуждение результатов. При решении поставленной задачи были получены параметры напряженно-деформированного состояния в двухслойной пластине при неполном проникновении пробойника после удара.

Распределение деформаций в нижнем слое биоткани и перемещений двухслойной пластины в конце ударного процесса представлено соответственно на рис. 2 и рис. 3. В процессе ударного взаимодействия пластины с пробойником не происходит изгиб верхнего слоя без разрушения, а наблюдается расслоение слоев металла и биоткани. Максимальная величина перемещения в металлическом слое наблюдается в зоне контакта с пробойником и равна 17,5 мм, что не превышает размер критической глубины вмятины 22 мм. Это позволяет предполагать о незначительном уровне действия запреградных эффектов.

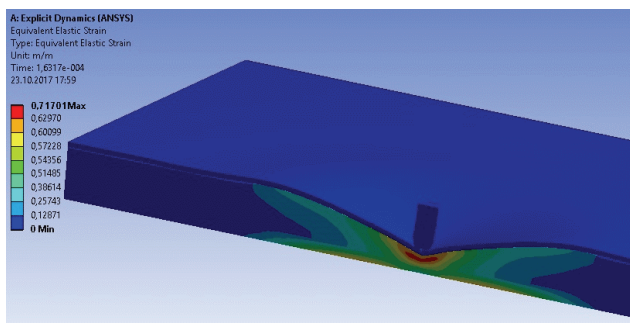


Рисунок 2 – Распределение деформаций в нижнем слое пластины при неполном проникновении пробойника

Несмотря на затухание скорости движения пробойника за счет потерь его кинетической энергии на термоупругопластическое деформирование металлического слоя пластины, поглощение энергии на образование лунки, расслаивание пластины, область деформирования биоткани значительно превышает размеры области локального деформирования металлического слоя.

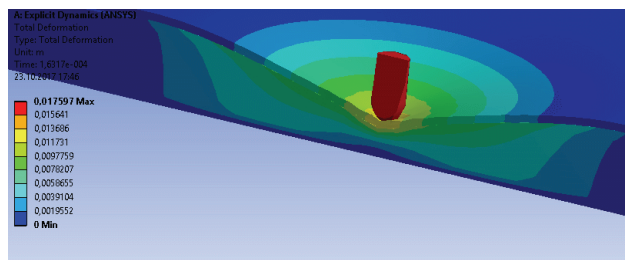


Рисунок 3 – Распределение перемещений в двухслойной пластине при неполном проникновении пробойника при ударе

Следует отметить, что усреднение механических характеристик биоткани при расчете искажает истинную волновую картину деформирования анизотропного материала (биоткани) нижнего слоя, а усреднение прочностных характеристик биоткани приводит к уменьшению объема биоматериала, охваченного деформированием и возможным разрушением.

Выводы. В работе проведено численное моделирование процесса деформирования двухслойной пластины (металл-биоткань) при ударе воздействием пробойником. Решалась нестационарная контактная термоупругопластическая задача для пластины, деформируемой при ударном воздействии пробойником. Численное решение задачи было получено методом конечных элементов с использованием независимого подхода Лагранжа-Эйлера при помощи программного комплекса ANSYS. Численное моделирование процесса ударного взаимодействия двухслойной пластины (металл-биоткань) и стальным пробойником позволило определить параметры напряженно-деформированного состояния пластины при начальной скорости пробойника 400 м/с и оценить величину глубины вмятины (лунки).

Список литературы:

1. Kneubuehl B.P. Measuring the Wounding Potential of Rifle and Handgun Ammunition / B.P. Kneubuehl // International workshop on wound ballistics. – Thun, Switzerland: 1999. – № 3. – P. 24.
2. Coupland R. Legal and health issues: International humanitarian law and the lethality or non-lethality of weapons / R. Coupland, D. Loyer // Non-Lethal Weapons: Technological and Operational Prospects. – 2000. – № 6. – P. 60.
3. Sellier K.G. Wound Ballistics and the Scientific Background / K.G. Sellier, B.P. Kneubuehl // Elsevier. – 1994. – ISBN 0-444-81511-2.
4. Amato J.J. Bone as a Secondary Missile: An Experimental Study in the Fragmenting of Bone by High-velocity Missiles / J.J. Amato, D. Syracuse, P.R. Seaver, N.Rich // J. Trauma. – 1989. – Vol. 29, No. 5. – PP. 609-612.
5. Peters C.E. A Mathematical-Physical Model of Wound Ballistics / C.E. Peters // J. Trauma (China). – 1990. – № 6. – PP. 303-318.
6. Автономова Л. В. Особенности высокоскоростного деформирования тонкой пластины с высокопрочным покрытием / Л. В. Автономова, С. В. Бондар, А. В. Стенук, В. Л. Хавин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 57. – С. 8-10.

Bibliography (transliterated):

1. Kneubuehl B.P. Measuring the Wounding Potential of

Rifle and Handgun Ammunition. International workshop on wound ballistics. Thun, Switzerland: 1999. No 3. P. 24.

2. Coupland R., Loye D. Legal and health issues: International humanitarian law and the lethality or non-lethality of weapons. Non-Lethal Weapons: Technological and Operational Prospects. 2000. No 6. P. 60.

3. Sellier K.G., Kneubuehl B.P. Wound Ballistics and the Scientific Background. Elsevier. 1994. ISBN 0-444-81511-2.

4. Amato J.J., Syracuse D., Seaver P.R., Rich N. Bone as a Secondary Missile: An Experimental Study in the Fragmenting

of Bone by High-velocity Missiles. J. Trauma. 1989. Vol. 29. No. 5. PP.609-612.

5. Peters C.E. A Mathematical-Physical Model of Wound Ballistics. J. Trauma (China). 1990. No 6. PP. 303-318.

6. Avtomomova L.V., Bondar S.V., Stepuk A. V., Xavin V.L. Osobnosti visokoskorostnogo deformirovaniy tonkoy plastinyi s visokoprochnym. Visnik NTU «KhPI». Seriya: Dinamika i mitsnist mashin. Kharkiv: NTU «KhPI». 2015. No 57. PP.8-10.

Поступила (received) 02.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Чисельне моделювання процесу деформування двошарової пластини при ударній взаємодії з пробійником / О.В. Степук, Л.В. Автономова, С.В. Бондар, В.Л. Хавін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 39 (1261). – С. 72-75. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9130.

Численное моделирование процесса деформирования двухслойной пластины при ударном воздействии пробойником / А.В. Степук, Л.В. Автономова, С.В. Бондарь, В.Л. Хавин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 39 (1261). – С. 72-75. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9130.

Numeral simulation of double-layer plate deform process under punch impact/ A.V.Stepuk, L.V. Avtomomova, S.V.Bondar, V.L. Khavin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 39 (1261). – С. 72-75. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2078-9130.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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.

Автономова Людмила Володимирівна – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник, НТУ «ХПІ», тел.: (057) 70 7-61-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com.

Автономова Людмила Владимировна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com.

Автомомова Ludmila – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Leading Researcher, NTU "KhPI", tel.: (057) 707-61-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com.

Бондар Сергій Володимирович – кандидат технічних наук, ст. науковий співробітник, НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: serg_xpi@mail.ru.

Бондарь Сергей Владимирович – кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: serg_xpi@mail.ru.

Bondar Sergiy – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, NTU "KhPI", tel.: (057) 707-61-78, e-mail: serg_xpi@mail.ru.

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.