

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

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОНКОЙ ПЛАСТИНЫ С ПОКРЫТИЕМ ПРИ УДАРЕ ПРОБОЙНИКОМ

У роботі методом кінцевого елемента проведено чисельне моделювання процесу ударної взаємодії тонкої двошарової пластини з двостороннім міцним покриттям при частковому проникненні сталевого пробойника з плоскою робочою частиною. Для визначення напружено-деформованого стану конструкції було вирішено нестационарну контактну крайову термовязкопластичну задачу з урахуванням нелінійної залежності зміни механічних властивостей матеріалу від температури і швидкості деформацій. Аналіз полів деформацій і напружень показав, що при неповному проникненні пробойника відбувається відшарування нижнього шару покриття і крихке руйнування верхнього шару, тобто перерозподіл поля напружень не призводить до повного руйнування пластини.

Ключові слова: удар, пластина, покриття, моделювання, термопружнопластичність, метод скінчених елементів.

В работе методом конечного элемента проведено численное моделирование процесса ударного воздействия на тонкую двухслойную пластину с двухсторонним покрытием стального пробойника с плоской рабочей частью при его частичном проникновении в пластину. Для определения напряженно-деформированного состояния конструкции была решена нестационарная контактная краевая термо-упругопластическая задача с учетом изменения механических свойств материала и их нелинейной зависимости от температуры и скорости деформаций. Анализ полей деформаций и напряжений показал, что при неполном проникновении пробойника происходит отслаивание нижнего слоя покрытия и хрупкое разрушение верхнего слоя, т.е. перераспределение поля напряжений не приводит к полному разрушению пластины или ее пробою. При использовании слоистых структур и прочных покрытий материалов пластинчатых элементов защитных конструкций из легких металлов и сплавов происходит повышение стойкости конструкции к разрушению при ударе.

Ключевые слова: удар, пластина, покрытие, моделирование, термоупругопластичность, метод конечных элементов.

A numerical simulation of the impact process on a thin two-layer plate with a double-sided coating of a steel punch having a flat working part with its partial penetration into the plate was carried out applying the finite element method. To determine the structure's stress-strain state, a non-stationary contact boundary thermo-elastoplastic problem was solved, in such way as to put in variation of the materials' mechanical properties and their nonlinear dependence on temperature and strain rate. Analysis of the deformations and stresses fields showed that when the punch is not fully penetrated, the lower layer of the coating peels off and the brittle fracture of the upper layer occurs, i.e. redistribution of the stress field does not lead to a complete destruction of the plate or its breakdown. With the use of layered structures and durable coatings of plate elements materials in protective structures made of light metals and alloys, the resistance of the structure to an impact failure increases.

Key words: impact, plate, coating, modeling, thermo-elasticity, finite element method.

Введение. При проектировании элементов защитных конструкций традиционно используются изотропные материалы с высокой прочностью и вязкостью, которые должны быть устойчивыми к проникновению пробойника. Исследование механизма разрушения защитных материалов элементов позволяет разработать математические модели, которые описывают процесс повреждения всей многокомпонентной конструкции. На практике также широко используются анизотропные материалы или материалы с покрытием для многослойных тонкостенных конструкции, поперечный удар по которым приводит к расслоению и дальнейшему разрушению. В следствие неоднородности свойств и слоистости структуры материала при ударе наблюдаются различные процессы разрушения (пластическое, хрупкое) элементов защитной конструкции. При исследовании деформирования и разрушения таких конструкций при ударном воздействии необходимо решать динамическую краевую задачу с использованием численных методов механики.

Анализ последних исследований и литературы. Вопросам динамического поведения многокомпонентных пластин при ударном воздействии посвящено много исследований. Так в работе [1] для описания

поведения композитных пластин при ударе используется теория Миндлина и закон Герца на основе МКЭ. Уточненная дискретно-структурная теория слоистых пластин применена при анализе отклика многослойной пластины на удар в работе [2]. Сравнение численных и экспериментальных результатов исследований поведения многослойных пластин при ударе проведено в работе [3]. Исследование разрушения при ударе композитных защитных пластин приведено в работе [4]. Анализ моделей, которые описывают процесс проникновения пробойника в слоистые структуры при ударе посвящена работа [5]. Численное решение методом конечного элемента вязкоупругих контактных задач при ударном взаимодействии и результаты исследований прочностных характеристик керамических покрытий приведено в работе [6]. Прочность алюминиевых пластин при ударном нагружении анализируется в работе [7]. Численное моделирование методом конечного элемента процесса высокоскоростного деформирования тонкой пластины из алюминиевого сплава с корундовым покрытием при ударе пробойником полусферической формы представлено в работе [8]. Исследование показало, что отслоение высокопрочного корундового покрытия оказывает влияние на характер развития процесса разрушения пластины по

толщине.

Целью данной статьи является численное определение напряженно-деформированного состояния тонкой двухслойной пластины с двухсторонним высокопрочным покрытием при частичном внедрении стального пробойника с плоской рабочей поверхностью.

Постановка задачи. При исследовании деформирования и разрушения многослойной пластины рассматривается частичное проникновение пробойника в пластину при ударе. Математическая модель, которая описывает динамическое поведение и разрушение при ударе при воздействии пробойником на тонкую двухслойную металлическую пластину с двухсторонним высокопрочным покрытием включает в себя уравнения закона сохранения массы, энергии и момента количества движения, условия неразрывности, нелинейные физические уравнения, зависящие от деформаций, скоростей деформаций и температуры, уравнение Грюнайзена, уравнение модели разрушения, условия контакта. Система уравнений в осесимметричной постановке в переменных Эйлера представлена в [5]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_v \rho dv &= 0, \\ \frac{d}{dt} \int_v \rho u_r dv &= \int_s (\sigma_{nn} n_r + \sigma_{n\tau} \tau_r) ds, \\ \frac{d}{dt} \int_v \rho u_z dv &= \int_s (\sigma_{nn} n_z + \sigma_{n\tau} \tau_z) ds, \\ \frac{d}{dt} \int_v \rho E dv &= \int_s (\sigma_{nn} u_n + \sigma_{n\tau} u_r) ds, \\ e_r &= \frac{1}{2\mu} \frac{D}{Dt} s_r + 2\lambda s_r, \quad e_z = \frac{1}{2\mu} \frac{D}{Dt} s_z + 2\lambda s_z, \\ e_{rz} &= \frac{1}{2\mu} \frac{D}{Dt} s_{rz} + 2\lambda s_{rz}, \\ P(\rho, \varepsilon) &= P_s(\rho) + \gamma(\rho, \varepsilon) \nu [\varepsilon - \varepsilon_s(\rho)], \\ \varepsilon_s(\rho) &= \begin{cases} \frac{B_0}{\rho_0} \frac{9}{2\varphi^2} \left\{ \exp\left[\varphi(1 - \delta^{1/3})\right] - 1 \right\}^2, & \text{при } \delta \leq 1, \\ \frac{B_0}{\rho_0} \frac{3}{\psi - 4} \left\{ \frac{3}{\psi} \exp\left[\psi(1 - \delta^{1/3})\right] - \delta^{-1} + \frac{\psi - 3}{\psi} \right\}, & \text{при } \delta > 1, \end{cases} \\ \gamma(\rho, \varepsilon) &= \frac{2}{3} + \frac{K}{\delta} + \left(\gamma_0 - K - \frac{2}{3} \right) \frac{1 + \nu L \delta^2}{(1 + L \delta^2)^2} \frac{\ln(1 + \delta)}{\ln 2}, \\ K &= \left(\beta - \frac{2}{3} \right) \left(1 + \frac{2}{\beta} \right)^{-1}; \quad \delta = \frac{\rho_0}{\rho}; \\ L &= \frac{\varepsilon}{\Lambda_0}; \quad P_s = \rho^2 \frac{d\varepsilon_s}{d\rho}. \end{aligned}$$

где t – время; r, φ, z – цилиндрические координаты; ρ – плотность; $u = (u_r, u_\varphi, u_z)$ – вектор скорости; E – полная

(удельная) энергия; σ_n – вектор напряжения на элементарной площадке с единичной нормалью $n = (n_r, n_\varphi, n_z)$ и единичной касательной $\tau = (\tau_r, \tau_\varphi, \tau_z)$; σ_{nn} – нормальная компонента вектора σ_n ; $\sigma_{n\tau}$ – касательная компонента вектора σ_n ; u_n, u_r – нормальная и касательная компоненты вектора u ; λ – неотрицательная функция; μ – модуль сдвига; D/Dt – производная по Яуману; $\varphi, \psi, \beta, \nu$ – параметры формулы; B_0 – модуль объемной адиабатической сжимаемости; ε_s, P_s – энергия сжатия и гидростатическое давление; γ_0 – термодинамический коэффициент Грюнайзена.

Для определения напряженно-деформированного состояния и оценки разрушения многослойной пластины при ударе необходимо решать нелинейную нестационарную термо-упругопластическую контактную задачу с учетом критериев разрушения. Для решения краевой задачи задаются граничные и начальные условия. В начальный момент времени отсутствуют напряжения и деформации во взаимодействующих телах. При контакте на свободных поверхностях также отсутствуют напряжения, а в зоне контакта при соударении пробойника с пластиной выполняется условие скольжения. На контактной границе сред (слоев) с различными характеристиками (свойства материала) должно выполняться равенство перемещений и напряжений. Т.к. рассматривается процесс высокоскоростного деформирования необходимо учитывать зависимость механических свойств материала от температуры и скоростей деформаций (при помощи семейства диаграмм деформирования, полученных для широкого диапазона температур и скоростей деформаций).

Численная реализация. Поставленная краевая нестационарная контактная задача термоупругопластичности численно может быть решена методом конечного элемента на основе независимого подхода Лагранжа-Эйлера, при использовании которого для оптимизации вычислительного процесса движение сетки задается независимо и определяется процессом деформирования материала. Нелинейная краевая задача термоупругопластичности решается итерационным методом Ньютона-Рафсона.

В работе представлено численное решение задачи высокоскоростного (ударного) нагружения круглой двухслойной пластины (толщина каждого слоя равна 6 мм) из стали и алюминиевого сплава радиусом равным 30 мм с двусторонним высокопрочным корундовым покрытием. Толщина нижнего и верхнего слоя покрытия равна 300 мкм. На контактных поверхностях между слоями пластины выполняются условия скольжения с трением. Пластина взаимодействует с стальным цилиндрическим ударником с плоской рабочей частью марки Ст3. Расчетная схема ударного нагружения пластины представлена на рис. 1.

Конечно-элементная модель пластины состоит из 8837 элементов. Модель материала представляется собой таблично заданное семейство кривых деформирования полученных экспериментально в широком диапазоне скоростей деформаций.

Напряженно-деформированное состояние пла-

стины определялось при значениях начальной скорости удара пробойника - 10м/с и 100м/с.



Рисунок 1 – Схема ударного нагружения двухслойной пластины с покрытиями

Обсуждение результатов. При решении поставленной задачи были получены параметры напряженно-деформированного состояния в круглой пластине алюминиевого сплава с двусторонним высокопрочным корундовым покрытием. На рис. 2 и рис. 3 представлено распределение перемещений двухслойной пластины в конце ударного процесса при скорости удара пробойника 10 м/с и 100 м/с соответственно.

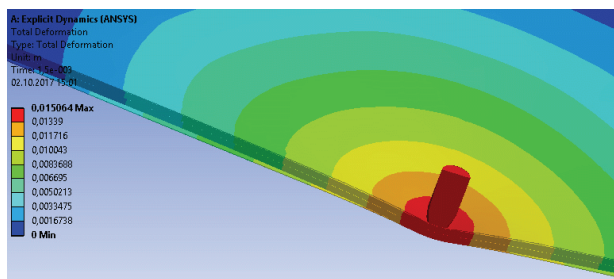


Рисунок 2 – Распределение перемещений в пластине с покрытием при скорости удара 10 м/с

При ударе пробойником с низкой скоростью 10 м/с наблюдается изгиб пластины и отслоение высокопрочного покрытия, но разрушения пластины и отрыва откольного слоя покрытия не происходит.

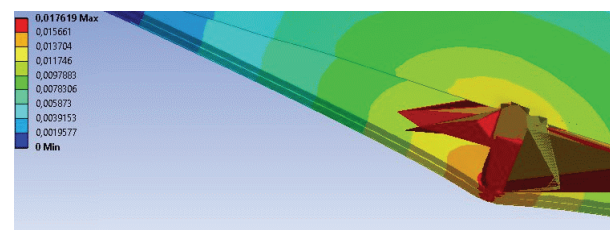


Рисунок 3 – Распределение перемещений в пластине с покрытием при скорости удара 100 м/с

При ударе пробойником со скоростью 100 м/с двухслойной пластины с двусторонним высокопрочным на сжатие (твердость) покрытием наблюдается расслоение ее и хрупкое разрушение материала. Для протекания и завершения процесса разрушения верхнего слоя покрытия достаточно упругой энергии при разрушении конструкции, т.к. материал покрытия обладает не высокой прочностью на растяжение. Вокруг зоны контакта наблюдается растрескивание и сколы верхнего высокопрочного слоя. Возникают радиальные и кольцевые трещины на поверхности покрытия, удаленной от области контакта. По толщине пластины распространяются расходящиеся под углом к траектории движения пробойника трещины конуса Герца и

боковые трещины, а нижний слой покрытия отслаивается. Экспериментально установлено, что в пластине с покрытием вследствие последовательно возникающих напряжений растяжения, сдвига и сжатия происходит макроструктурное разрушение материала, сопровождающееся помимо этого развитием микродефектов: межкристаллитных микротрещин, дислокаций, двойникования, образование полос сдвига и другими, влияющими на механические свойства материала. При внедрении пробойника в тонкую металлическую пластину происходит также его деформирование, а площадь контакта увеличивается. В связи с потерями кинетической энергии пробойника (деформирование пробойника, расход энергии, поглощенной материалом пластины на пластическое деформирование при расширении пробивного отверстия, изгиб всей пластины, дополнительный расход энергии на трещинообразование, отслаивание, разрушение и отрыв и отколы слоя покрытия) происходит затухание скорости внедрения пробойника, уменьшаются запреградные эффекты. При ударе пробойником металлической пластины без высокопрочного покрытия происходит ее разрушение (выбивание поврежденного материала – пробки из траектории движения пробойника).

Выводы. Проведено численное моделирование процесса ударного взаимодействия тонкой двухслойной пластины с двусторонним высокопрочным покрытием и стальным пробойником с плоской рабочей частью. Решение нестационарной контактной термоупругопластической задачи было получено методом конечных элементов с использованием независимого подхода Лагранжа-Эйлера. Расчет напряженно-деформированного состояния пластины при двух значениях ударной скорости пробойника (10м/с и 100м/с) дало возможность проанализировать процесс динамического деформирования и разрушения высокопрочного покрытия. Выявлено, что при использовании прочных покрытий происходит повышение стойкости пластинчатых элементов защитных конструкций из легких металлов и сплавов к разрушению при ударе.

Список литературы:

1. *Tiberkak R.* Damage prediction in composite plates subjected to low velocity impact / *R. Tiberkak, M. Bachene, S. Rechak, B. Necib* // *Composite structures*. – 2008. – Vol. 83. – P. 73-82.
2. *Nosier A.* Low-velocity impact of laminated composites using a layerwise theory / *A. Nosier, R.K. Kapania* // *Comput. Mechanics*. – 1994. – № 13. – P. 360-379.
3. *Choi I. H.* Low-velocity impact response of composite laminates considering high-order shear deformation and large deflection / *I. H. Choi, C. S. Hong* // *Mech. Composite Materials and Structures*. – 1994. – Vol. 1, № 2. – P. 157-170.
4. *Hazell P.J.* Impact, penetration and perforation of a bonded CFRP composite panel by a high velocity steel sphere: an experimental study / *P.J. Hazell, G.J. Appleby-Thomas, G. Kister* // *Cranfield Defence and Security, Cranfield University*. – *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. – 2010. – Vol. 45 (6). – PP. 439-450.
5. *Patel B.P.* Penetration of Projectiles in Composite Laminates / *B.P. Patel, S.K. Bhola, M. Ganapathi, and D.P. Makhecha* // *Institute of Armament Technology*. – Pune

411 025. – Defence Science Journal. – April 2004. – Vol. 54, No. 2. – PP. 151-159.

6. Śliwa A. Finite Element Method application for modeling of PVD coatings properties / A. Śliwa, L.A. Dobrzański, W. Kwaśny, W. Sitek // Journal of Achievements in Materials and Manufact.Eng. – 2008. – Vol. 27.

7. Sudhakara I. Enhancement of wear and ballistic resistance of armour grade AA7075 aluminium alloy using friction stir processing / I. Sudhakara, V. Madhub et al // Defence Technology. – November 2014.

8. Автономова Л. В. Особенности высокоскоростного деформирования тонкой пластины с высокопрочным покрытием / Л. В. Автономова, С. В. Бондар, А. В. Степук, В. Л. Хавин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 57. – С. 8-10.

Bibliography (transliterated):

1. Tiberkak R., Bachen M., S. Rechak S., Necib B. Damage prediction in composite plates subjected to low velocity impact. Composite structure. 2008. Vol. 83. PP. 73-82.

2. Nosier A., Kapani R.K. Low-velocity impact of laminated composites using a layerwise theory. Comput. Mechanics. 1994. No 13. PP. 360-379.

3. Choi I.H., Hong C.S. Low-velocity impact response of composite laminates considering high-order shear deformation and large deflection. Mech. Composite Materials and Structures. 1994. Vol. 1, No 2. PP. 157-170.

4. Hazell P.J., Appleby-Thomas G.J. and Kister G. Impact, Penetration and Perforation of a Bonded CFRP Composite Panel by a High Velocity Steel Sphere: an Experimental Study. Cranfield Defence and Security, Cranfield University, Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2010. Vol. 45 (6). PP. 439-450.

5. Patel B.P., Bhola S.K., Ganapathi M., Makhecha D.P. Penetration of Projectiles in Composite Laminates. Institute of Armament Technology, Pune-411 025, Defence Science Journal. April 2004. Vol. 54, No. 2. PP. 151-159.

6. Śliwa A., Dobrzański L.A., Kwaśny W., Sitek W. Finite Element Method Application for Modeling of PVD Coatings Properties. Journal of Achievements in Materials and Manufact. Eng. 2008. Vol. 27.

7. Sudhakara I., Madhub V. et al. Enhancement of Wear and Ballistic Resistance of Armour Grade AA7075 Aluminium Alloy Using Friction Stir Processing. Defence Technology November 2014.

8. Avtomomova L.V., Bondar S.V., Stepuk A. V., Xavin V.L. Osobenosti visokoskorostnogo deformirovaniy tonkoy plastinyi s visokoprochnyim [High-speed deformation of a high-strength coated thinplate]. Visnik NTU "KhPI". Seriya: Dinamika imitsnist mashin. Kharkiv: NTU "KhPI". 2015. No. 57. PP.8-10.

Поступила (received) 09.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Чисельне визначення напружено-деформованого стану тонкої пластины з покриттям при ударній дії пробійника / О.В. Степук, Л.В.Автономова, С.В. Бондар, В.Л. Хавин, С.І. Марусенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 39 (1261). – С. 68-71. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-9130.

Численное определение напряженно-деформированного состояния тонкой пластины с покрытием при ударном воздействии пробойника / А.В. Степук, Л.В. Автономова, С.В. Бондар, В.Л. Хавин, С.И. Марусенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 39 (1261). – С. 68-71. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-9130.

Numeral determination of the tensely-deformed state of coated thin plate at shock influence punch / A.V.Stepuk, L.V. Avtomomova, S.V.Bondar, V.L. Khavin, S.I.Marusenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 39 (1261). – С. 68-71. – Bibliogr.: 8. – 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) 707-61-78, e-mail: lavtomomova@gmail.com.

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

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

Хавин 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.

Марусенко Світлана Іванівна – науковий співробітник, НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-61-78.

Марусенко Светлана Ивановна – научный сотрудник, НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-61-78.

Marusenko Svitlana – Researcher, NTU "KhPI", tel.: (057) 707-61-78.