

Воробьев Ю. С.

Овчарова Н. Ю.

*Институт проблем
машиностроения
им. А.Н. Подгорного
НАН Украины*

Vorobiev Iu. S.

Ovcharova N. Iu.

*A.N. Podgorny Institute
for Mechanical
Engineering Problems
of the National Academy
of Sciences of Ukraine*

УДК: 539.3

ДИНАМИКА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ УДАРНЫХ НАГРУЗКАХ

Рассматривается скоростное деформирование элементов конструкций современной техники под действием локальных ударных нагрузок. Используются трехмерные конечно-элементные модели с учетом больших упругопластических деформаций и динамических свойств материалов. 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 производных. Функции форм при этом позволяют описывать непрерывное и гладкое изменение напряжений.

Проведен численный анализ динамического напряженно-деформированного состояния элементов конструкций под действием ударников и птиц с различными скоростями. Рассмотрены плоские и цилиндрические элементы из полимерных материалов. Показано развитие динамического напряженно деформированного состояния в упругой и пластической стадиях, в зависимости от скорости ударника. Видно, что зона интенсивных напряжений при локальном ударе очень ограничена. Это позволяет выделить область, в которой используется более густая сетка.

Серии численных расчетов позволяют выявить особенности скоростного деформирования элементов современных конструкций и дать рекомендации по повышению их динамической прочности в различных условиях нагружения.

Ключевые слова: *локальный удар, высокоскоростные процессы, упругопластические деформации, трехмерные конечно-элементные модели.*

Введение. Ряд элементов конструкций современной техники подвержен действию локальных ударных нагрузок. К ним относятся элементы транспортных средств, военной, авиационно-космической техники, двигателей, защитных боксов, технологических камер и др.. Локальные ударные нагрузки возникают под действием различного вида ударников. Значительный интерес в ряде случаев представляет воздействие птиц. Динамической прочности таких элементов посвящен ряд работ, например [1–7]. Эти исследования показывают, что хотя ряд элементов таких конструкций является тонкостенными, но при воздействии локальных ударных нагрузок, в них возникает трехмерное динамическое напряженно-деформированное состояние.

Поэтому следует использовать трехмерные модели. При интенсивных ударных воздействиях возникают конечные динамические перемещения и деформации. Процесс деформирования протекает в упругопластической стадии. Для элементов конструкций часто используются композитные материалы. При анализе скоростного деформирования следует учитывать динамические свойства материалов, которые определяются на основе экспериментальных данных [1].

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.

Для обеспечения динамической прочности указанных элементов конструкций необходимо провести численный анализ динамического напряженно-деформированного состояния элементов конструкций под действием ударников и птиц с различными скоростями. Рассмотрены плоские и цилиндрические элементы конструкций из полимерных материалов. Показано развитие динамического напряженно деформированного состояния в упругой и пластической стадиях, в зависимости от скорости ударника. Видно, что зона интенсивных напряжений при локальном ударе очень ограничена. Напряжения быстро уменьшаются во времени и пространстве. Имеет смысл рассматривать напряжение в зоне, которая в 5 – 10 раз превышает размеры зоны приложения локальной нагрузки [7 – 9]. Это позволяет выделить область, в которой используется более густая сетка. Такой подход позволяет дать более точную оценку распределения наибольших перемещений и напряжений с большими градиентами. При необходимости процесс сгущения сетки в

наиболее интересующей исследовании области может быть продолжен [7, 8].

Серии численных расчетов позволяют выявить особенности скоростного деформирования элементов защитных конструкций и дать рекомендации по повышению их динамической прочности в различных условиях нагружения.

Постановка задачи и моделирование.

Математическая модель должна учитывать неоднородность материала элементов конструкций как изначально заданную так и возникшую в процессе скоростного деформирования. Поэтому все характеристики материала являются переменными по пространственным координатам и во времени. В методе конечных элементов задача решается в перемещениях. Уравнения динамики для трехмерного неоднородного элемента обычно представлены в напряжениях [8, 9]. Поэтому они должны быть дополнены зависимостями напряжений от деформаций и деформаций от перемещений. Зависимости напряжений от деформаций определяются на основе динамического варианта теории пластических деформаций. В прямоугольной системе координат x, y, z эти зависимости имеют вид:

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

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

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (2)$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

Зависимости (1) могут быть представлены в цилиндрической системе координат [8, 9].

В случае упругих деформаций $\psi = \frac{1}{2\mu}$

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 $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$ [8, 9]. В данном случае используются зависимости типа Пэжины [1].

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

где E – модуль упругости;
 m и r – коэффициенты чувствительности к скорости деформации;

$\dot{\varepsilon}_i^{pl}$ – скорость деформации в пластической стадии

Зависимости (2), (3), (4) приводят к физической нелинейности задачи.

В случае интенсивных локальных нагрузок предположение о малости перемещений и деформаций неприемлемо. Поэтому используются зависимости для конечных деформаций и перемещений [2, 3]. Эти зависимости определяют геометрическую нелинейность задачи.

При этом следует использовать трехмерные конечные элементы, которые отражают все особенности математической модели процесса скоростного деформирования

материала. Моделирование локальных нагрузок зависит от их вида. При воздействии ударника решается контактная динамическая задача. При воздействии других видов импульсных нагрузок они прилагаются на поверхности детали в соответствующих узлах конечных элементов.

Опыт анализа особенностей динамического НДС элементов конструкций при воздействии локальных нагрузок показывает, что на расстоянии, превышающем размеры зоны приложения нагрузки в 5 – 10 раз, величина напряжений резко падает. Это позволяет выделить ограниченную область элемента конструкции, в которой с помощью сгущения сетки можно уточнить результат без увеличения объема вычислительных расчетов [7 – 9].

Результаты численного анализа.

Проведены численные исследования динамического напряженно-деформированного состояния элементов ряда реальных конструкций [7 – 9]. В качестве плоских элементов рассмотрены стеклопластиковые части облицовки локомотивов под действием металлического ударника массой 100 г с разными скоростями. Материалом облицовки является стеклопластик с модулем упругости - $E = 5,4 \cdot 10^{10}$ Па, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,45$ и плотностью $\rho = 2400$ кг/м³. На рис.1 показаны поля эквивалентных напряжений для плоского элемента при воздействии ударника со скоростью 80 м/с.

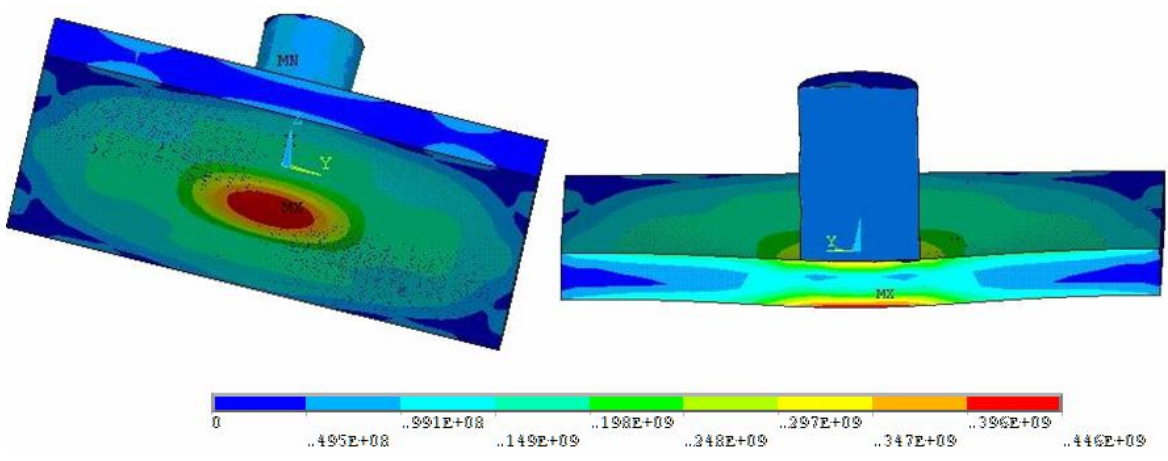


Рис. 1. Распределение эквивалентных напряжений в плоском элементе при воздействии ударника со скоростью 80 м / с

На рис. 2 приведены распределения эквивалентных напряжений при воздействии ударника со скоростью 180 м/с. При

дальнейшем увеличении скорости соударения происходят необратимые деформации и разрушение элемента.

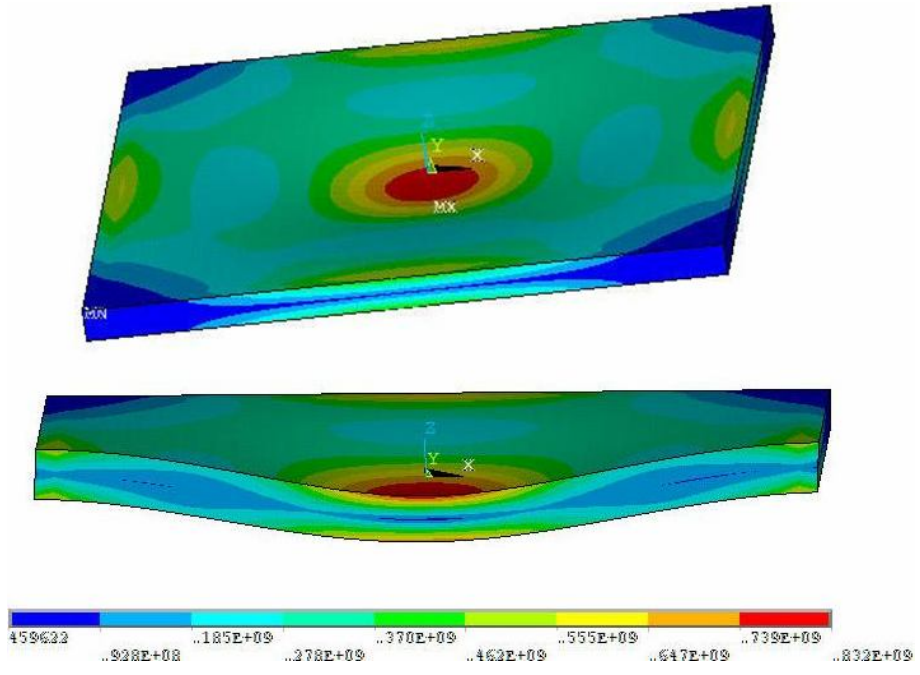


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений в плоском элементе при воздействии ударника со скоростью 180 м / с

Проведен анализ воздействия ударника массой 0,1 кг на внутреннюю поверхность защитного элемента корпуса ГТД из композитного материала. Рассмотрен элемент с внутренним диаметром 800 мм., толщиной 30 мм., плотностью материала $\rho=1300 \text{ кг/м}^3$, модулем упругости $E=2660 \text{ МПа}$, коэффициентом Пуассона $\nu=0,45$. При воздействии ударника со скоростью 400 м/с максимальные перемещения составили

$0,167 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, а максимальная интенсивность напряжений 54 МПа, что соответствует упругим деформациям. При скоростях ударника 1000 м/с и более возникают пластические деформации, а после разгрузки наблюдаются остаточные деформации. На рис. 3 показаны поля эквивалентных динамических напряжений в сечении в зоне удара в разные моменты времени при воздействии ударника со скоростью контакта 1000 м/с.

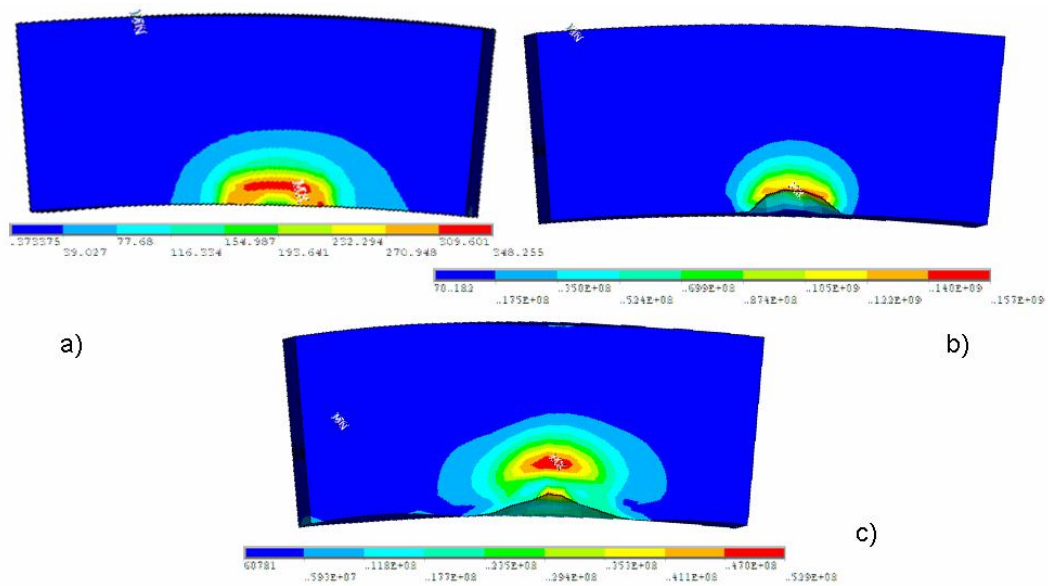
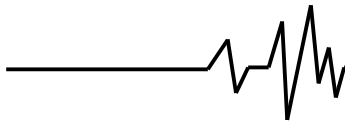


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений в сечении в зоне удара в моменты времени: а) $t=0.001 \text{ с}$, б) $t=0.01 \text{ с}$, в) $t=0.1 \text{ с}$



Видно развитие упругопластических напряжений, которые достигают максимума при $t = 0.01$ с и появление остаточных напряжений после разгрузки при $t = 0.1$ с. При локальных ударных нагрузках наибольшие перемещения и напряжения развиваются в ограниченных зонах и быстро убывают по пространственным координатам и во времени. Эти особенности динамического напряженно-деформированного состояния позволяют выделить соответствующую область элемента и провести для нее уточненные расчеты с использованием более густой сетки.

Результаты исследований показывают, что необходимой прочностью и наименьшим весом обладают элементы из композитного материала. Целесообразно рассмотреть столкновение с птицами элементов облицовки

транспортных средств из композитного материала, так как в этом случае на элемент действует ударная волна при разрушении внутренних тканей птицы. Скорость волновой нагрузки выше скорости контакта птицы с преградой [2 – 6]. В данном случае плотность тела птицы принята $\rho = 1300 \text{ кг/м}^3$, скорость 480 м/с.

На рис. 4. представлены максимальные эквивалентные напряжения при столкновении с птицей. В дальнейшем перемещения возрастают и достигают максимума через 0.001с после начала контакта, а напряжения в зоне приложения нагрузки уменьшаются, но достигают максимума на границах элемента (рис. 5).

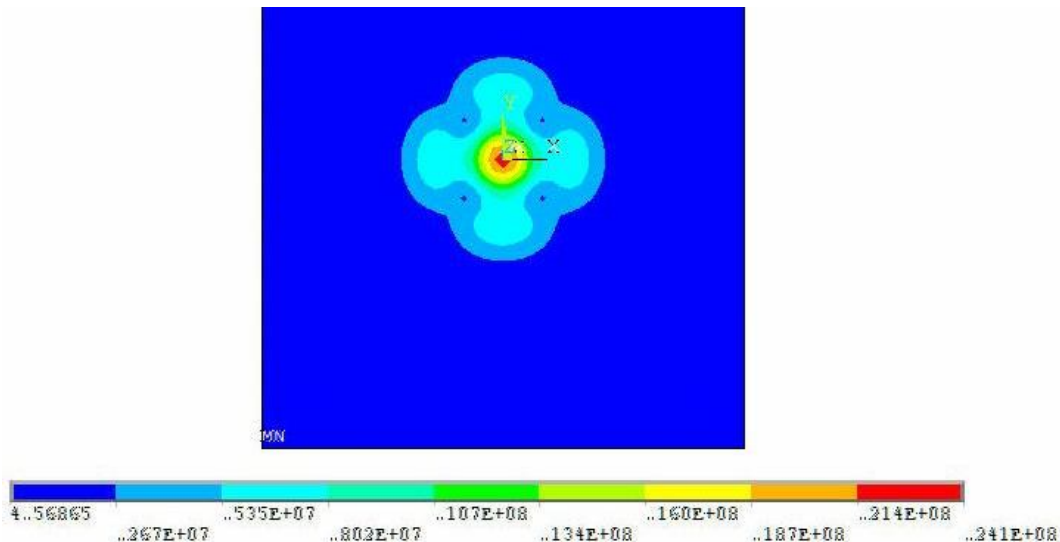


Рис. 4. Распределение максимальных эквивалентных напряжений при ударе птицей в момент времени $t=0.0002$ с после начала контакта

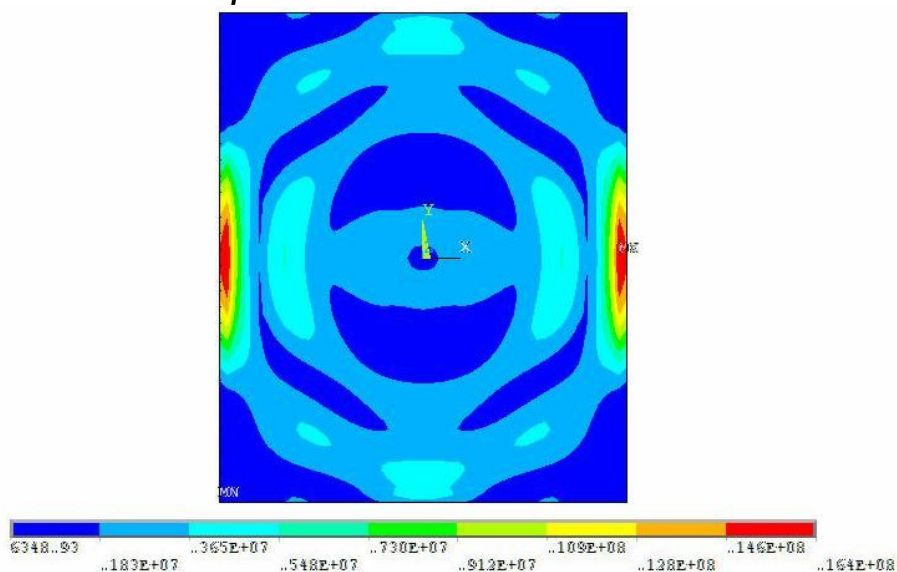
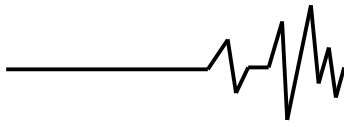


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений при ударе птицей в момент времени $t=0.001$ с после начала контакта



Выводы. Элементы конструкций современной техники подвержены действию интенсивных ударных нагрузок. Их скоростное деформирование происходит в упруго-пластической стадии. Большие скорости деформаций требуют учета динамических свойств материала. При действии локальных ударных нагрузок, даже в тонкостенных элементах возникает трехмерное напряженно-деформированное состояние с большими градиентами. В результате возникает необходимость развития сложных трехмерных конечно-элементных моделей, учитывающих конечные упруго-пластические деформации с зависимостью свойств материалов от деформаций и скоростей деформаций.

Рассматривается контактное воздействие ударников и импульсных нагрузок, описывающих столкновение с птицами. Показаны особенности развития процесса скоростного деформирования элементов конструкций. Анализ динамического напряженно-деформированного состояния показывает локализацию напряжений в зоне удара и быстрое падение напряжений по мере удаления от этой зоны и при разгрузке. Целесообразно выделять область вокруг зоны приложения нагрузки, в которой проводится уточнение результатов за счет сгущения сетки. Результаты исследований позволяют дать практические рекомендации по снижению уровня динамических напряжений и повышению динамической прочности элементов конструкций.

Список использованных источников

1. Meyers M.A. Dynamics behavior of materials / M.A. Meyers // Wiley. – New York, 1994. – 668 p.
2. Storace A.F. Analytical and Experimental of Bird Impact on Fan and Compressor Blading / A.F. Storace, R.P. Nimmer, R. Ravenhall // Journal of Aircraft. – Vol. 21, № 7. – 1984. – P. 520 – 527.
3. Wilbeck J.S. The Development of a Substitute Bird Model / J.S. Wilbeck, J.L. Rand. // Journal Engineering for Power. – 103. – 1981. – P. 725 – 730.
4. Голощапов В.Н. Некоторые результаты обобщения физических, геометрических и весовых характеристик птиц, необходимых для оценки динамических процессов при соударении с преградой / В.Н. Голощапов, В.Ч. Лебединский, В.Э. Якоби, В.И. Янчина // Защита материалов и технических устройств от птиц. – Москва. – 1983. – С. 202 – 214.

5. Heyman F.J. High Speed Impact between a Liquid Drop and Solid Surface / F.J. Heyman // Journal of Applied Physics. – Vol. 40, № 13. – 1969. – P. 5112 – 5122.

6. Cassenti B.N. Hugoniot Pressure Loading in Soft Body Impacts / B.N. Cassenti // AIAA Paper. – № 79, 0782. – 1979. – P. 241 – 248.

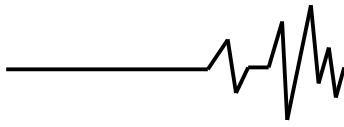
7. Vorobiov Y. Strain rate deformation and damage of structural elements under local impulse loadings / Y. Vorobiov, M. Chernobryvko, L. Kruszka // Military University of Technology. – Warsaw. – 2010. – P. 679 – 687.

8. Vorobiov Y. Nonlinear deformations of structures cylindrical element under local shock / Y. Vorobiov, N. Ovcharova, L. Kruszka // Proceedings of the 4th International Conference on Nonlinear Dynamics ND-KhPI2013. – Ukraine. – 2013. – P. 351 – 357.

9. Vorobiov Iu.S., Kruszka L., Ovcharova N.Y., Finite Element Analysis of Local Shock Loading on Structures Cylindrical Elements / Iu.S. Vorobiov, L. Kruszka, N.Y. Ovcharova // Proceedings of The 8th International Symposium on Impact Engineering (ISIE2013). – Osaka University. – Japan. – 2013. – P. 499 – 504.

Список источников в транслитерации

1. Meyers M.A. Dynamics behavior of materials / M.A. Meyers // Wiley. – New York, 1994. – 668 p.
2. Storace A.F. Analytical and Experimental of Bird Impact on Fan and Compressor Blading / A.F. Storace, R.P. Nimmer, R. Ravenhall // Journal of Aircraft. – Vol. 21, № 7. – 1984. – P. 520 – 527.
3. Wilbeck J.S. The Development of a Substitute Bird Model / J.S. Wilbeck, J.L. Rand. // Journal Engineering for Power. – 103. – 1981. – P. 725 – 730.
4. Goloshchapov V.N. Nekotoryye rezul'taty obobshcheniya fizicheskikh , geometricheskikh i vesovykh kharakteristik ptits , neobkhodimykh dlya otsenki dinamicheskikh protsessov pri soudareniyakh s pregradoy / V.N. Goloshchapov , V.CH. Lebedinskiy , V.E. Yakoby , V.I. Yanchina // Zashchita materialov i tekhnicheskikh ustroystv ot ptits. – Moskva. – 1983. – С. 202 – 214 .
5. Heyman F.J. High Speed Impact between a Liquid Drop and Solid Surface / F.J. Heyman // Journal of Applied Physics. – Vol. 40, № 13. – 1969. – P. 5112 – 5122.
6. Cassenti B.N. Hugoniot Pressure Loading in Soft Body Impacts / B.N. Cassenti // AIAA Paper. – № 79, 0782. – 1979. – P. 241 – 248.



7. Vorobiov Y. Strain rate deformation and damage of structural elements under local impulse loadings / Y. Vorobiov, M. Chernobryvko, L. Kruszka // Military University of Technology. – Warsaw. – 2010. – P. 679 – 687.

8. Vorobiov Y. Nonlinear deformations of structures cylindrical element under local shock / Y. Vorobiov, N. Ovcharova, L. Kruszka // Proceedings of the 4th International Conference on Nonlinear Dynamics ND-KhPI2013. – Ukraine. – 2013. – P. 351 – 357.

9. Vorobiov Iu.S., Kruszka L., Ovcharova N.Y., Finite Element Analysis of Local Shock Loading on Structures Cylindrical Elements / Iu.S. Vorobiov, L. Kruszka, N.Y. Ovcharova // Proceedings of The 8th International Symposium on Impact Engineering (ISIE2013). – Osaka University. – Japan. – 2013. – P. 499 – 504.

ДИНАМІКА ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

Анотація. Розглядається швидкісне деформування елементів конструкцій сучасної техніки під дією локальних ударних навантажень. Використовуються тривимірні скінчено-елементні моделі з урахуванням великих пружно-пластичних деформацій і динамічних властивостей матеріалів. Задача вирішується варіантом методу скінчених елементів, який враховує специфіку розглянутого процесу. Важливою вимогою до вибору типу скінчених елементів є врахування всіх зазначених факторів. Граничні умови в вузлах елементів повинні задовольняти рівності як переміщень, так і похідних. Функції форм при цьому дозволяють описувати безперервну і гладку зміну напружень.

Проведено чисельний аналіз динамічного напружено-деформованого стану елементів конструкцій під дією ударників із різними швидкостями. Розглянуто плоскі та циліндричні елементи конструкцій з полімерних матеріалів. Показано розвиток динамічного напружено деформованого стану в пружній і пластичній стадіях, залежно від швидкості ударника. Видно, що зона інтенсивних напружень при локальному ударі дуже обмежена. Це дозволяє виділити

область, в якій використовується більш густа сітка.

Серії чисельних розрахунків дозволяють виявити особливості швидкісного деформування елементів сучасних конструкцій і дати рекомендації щодо підвищення їх динамічної міцності в різних умовах навантаження.

Ключові слова: локальний удар, високошвидкісні процеси, пружно-пластичні деформації, тривимірні скінчено-елементні моделі.

DYNAMICS OF STRUCTURAL ELEMENTS UNDER IMPACT LOADS

Annotation. The high-rate deformations of structural elements of modern technology under the action local impact loads are considered. Three-dimensional finite-element models taking into account large elastoplastic deformations and dynamic properties of materials are used. The problem is solved for the case of the finite element method, which takes into account the specifics of the process. An important requirement for the choice of the finite element is the consideration of all these factors. Boundary conditions in the element nodes must satisfy the equality movement as well as derivatives. The function forms, while allowing to describe continuous and smooth stress changes.

The numerical analysis of the dynamic stress-strain state of structural elements under the action of projectiles with different speeds was carried. Plane and cylindrical elements from composite materials are considered. The development of the dynamic stress-strain state in the elastic and plastic stages depending on the speed of the projectile shows. It can be seen, that the zone of intense stresses at the local impact is very limited. This allows to select the area in which used a more dense grid.

A series of numerical calculations allow to reveal the features of high-rate deformations elements of protective structures and make recommendations to improve their dynamic strength under different loading conditions.

Key words: local impact, lightweight structures, high rate process, elastoplastic deformation, 3D FEM model.