

6. Почтман Ю. М. Применение метода случайного поиска при оптимальном проектировании цилиндрических оболочек / Ю.М. Почтман, Г.В. Филатов // Изд. АН СССР. Механика твердого тела. – 1971. – №5. – С. 149-201.
7. Тетерс Г. А. Оптимизация оболочек из слоистых композитов / Г.А. Тетерс, Р.Б. Рикардс, В.Л. Нарусберг. – Рига : Зинатне, 1978. – 239 с.
8. Юдин Д. Б. Задачи и методы стохастического программирования / Д.Б. Юдин. – М. : Сов. Радио, 1979. – 392 с.

REFERENCES

1. Liu, B. (1999), "Uncertain Programming", Wiley, New York, USA.
2. Borisov, V.V., Fedulov, A.S. and Zernov, M.M. (2014), *Osnovi nechetkoy matematiki* [Fuzzy mathematic bases], vol. 1: Teoriya nechetkikh mnozhestv, Telekom, Moskow, Russia.
3. Borisov, V.V., Fedulov, A.S. and Zernov, M.M. (2014), *Osnovi nechetkoy matematiki* [Fuzzy mathematic bases], vol. 2: Teoriya nechetkikh mnozhestv, Telekom, Moskow, Russia.
4. Dyubua, A. and Prad, A. (1990), *Teoriya veroyatnostey: Prilozhenie k predstavleniyu znaniy v invormatike* [Probability theory. Knowledge application for representation in computer science], Radio i svyaz, Moskow, Russia.
5. Ginzburg, S.N. and Kan S.N. (1970), "About one of the method to choose optimal parameters of thin walled structure", *Trudy VI Vsesoyuznoy konferentsii po teorii obolochek i plastin. Dnepropetrovsk, 1969* [Conference proceedings of the 6 th soviet union conference of shells and plats], pp. 271-273.
6. Pochtman, Yu.M. and Filatov, G.V. (1971), "Random search method application to the optimal design of cylindrical shells", *Mekhanika tverdogo tela*, vol. 5, pp. 149-201.
7. Teters, G.A., Rikards, R.B. and Narusberg, V.L. (1978), *Optimizatsiya obolochek iz sloistykh kompozitov* [Laminated composites shells optimization], Zinatne, Riga, Latviya.
8. Yudin, D.B. (1979), *Zadachi i metody stakhasticheskogo programmirovaniya* [Objectives and methods of stochastic programming], Sov. Radio, Moskow, Russia.

УДК 539.3

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА НА СКОРОСТНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Воробьев Ю. С., д. т. н., профессор, Овчарова Н. Ю., ведущий инженер

*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАНУ,
ул. Дм. Пожарского, 2/10, Харьков, 61046, Украина*

vorobiev@ipmash.kharkov.ua

Рассматривается скоростное деформирование элементов современных конструкций под действием локальных ударных нагрузок. Трехмерные модели учитывают конечные динамические упругопластические деформации и динамические свойства материала. Задача решается вариантом метода конечных элементов, который учитывает специфику рассматриваемого процесса. Проведен численный анализ динамического напряженно-деформированного состояния элементов конструкций под действием ударных нагрузок с учетом различных динамических свойств материалов.

Ключевые слова: скоростное деформирование, ударные нагрузки, динамические свойства материалов, МКЭ, упруго-пластические деформации.

ВПЛИВ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛУ НА ШВИДКІСНЕ ДЕФОРМУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ

Воробйов Ю. С., д. т. н., професор, Овчарова Н. Ю., провідний інженер
 Інститут проблем машинобудування ім. А.Н. Підгорного НАН України,
 вул. Дм. Пожарського, 2/10, Харків, 61046, Україна,

vorobiev@ipmach.kharkov.ua,

Розглядається швидкісне деформування елементів сучасних конструкцій під дією локальних ударних навантажень. Тривимірні моделі враховують кінцеві динамічні пружно-пластичні деформації та динамічні властивості матеріалу. Завдання вирішується варіантом методу скінченних елементів, який враховує специфіку даного процесу. Проведено чисельний аналіз динамічного напружено-деформованого стану елементів конструкцій під дією ударних навантажень з урахуванням різних динамічних властивостей матеріалів.

Ключові слова: швидкісне деформування, ударні навантаження, динамічні властивості матеріалів, МСЕ, пружно-пластичні деформації.

INFLUENCE OF THE DYNAMIC PROPERTIES OF THE MATERIAL ON THE HIGH-RATE DEFORMATION OF STRUCTURAL ELEMENTS

Vorobiev Yu. S., D. of Technical Science, Professor, Ovcharova N. Yu., Principal Engineer

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

vorobiev@ipmach.kharkov.ua, spe@machproekt.nikolaev.ua

Analysis of the dynamic stress-strain state of a number of modern structures, such as input and output devices, cases of gas turbine engines, safety boxes, process chambers, lining elements of vehicles, personal protective elements of energy systems, aerospace, transport and military equipment, under the influence of local shock and impulse loads is an actual and complex problem [1-6]. Identification of danger zones localization of stresses in impact places allows to find ways to reduce their level and increase the dynamic stability of elements of critical structures. This requires the construction of refined mathematical models. Together with intense impact loads, three dimensional dynamic stress-strain state develops in the elastic-plastic stage. Strength properties of most materials change depending on the value and rate of deformation. Therefore three-dimensional models with the dynamic properties of the material, which are determined on the basis of experimental studies are used [1-7]. In different papers different approaches and methods of accounting of the dynamic properties of materials are used. Influence of dynamic properties of materials in the process of high-rate deformation of structural elements is an actual and vital problem. If the equation of state reflects the elastic-plastic character of deformation and dynamic properties of the material, then the problem is physically nonlinear. Under intense loads finite displacement and deformation arises resulting in geometrical nonlinearity of problems.

A mathematical model for the analysis of the problem must take into account the heterogeneity of the material's structural elements as originally given as well as arisen during high-rate deformation. Therefore, all the material characteristics are variable in the spatial coordinates and time.

The problem is solved using the finite element method, which takes into account the specifics of the process. Boundary conditions in the element nodes must satisfy the equality movement as well as derivatives. The formed function allows to describe continuous and smooth stress changes. The numerical analysis of the dynamic stress-strain state of structural elements under impact loads, takes into account different dynamic properties of the materials. A series of numerical calculations allows to reveal the features of high-rate deformation elements of protective structures and makes recommendations to improve their dynamic strength under different loading conditions.

Key words: high-rate deformation, impact loads, dynamic material properties, FEM, elastic-plastic deformations.

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализ динамического напряженно-деформируемого состояния ряда современных конструкций под действием локальных ударных и импульсных нагрузок является актуальной и сложной проблемой [1-6]. К таким конструкциям относятся входные, выходные устройства и корпуса ГТД, защитные боксы, технологические камеры, элементы облицовки транспортных средств, индивидуальные средства защиты элементов энергетических систем, авиационной, космической, транспортной и военной техники. Выявление зон опасной локализации напряжений в местах удара позволяет найти пути снижения их уровня и повышения динамической прочности элементов ответственных конструкций. Для этого необходимо построение уточненных математических моделей. При интенсивных ударных нагрузках возникает трехмерное динамическое напряженно-деформированное состояние,

которое развивается в упруго-пластической стадии. Прочностные свойства большинства материалов изменяются в зависимости от величины и скорости деформации. Поэтому используются трехмерные модели с учетом динамических свойств материала, которые определяются на основе экспериментальных исследований [7-10]. В различных работах используется различные подходы и способы учета динамических свойств материалов. Учет влияния динамических свойств материалов на процесс скоростного деформирования элементов конструкций является актуальной задачей. Если уравнения состояния отражают упругопластический характер деформирования и динамические свойства материала, то задача является физически нелинейной. При интенсивных нагрузках возникают конечные перемещения и деформации, что приводит к геометрической нелинейности задачи.

Математическая модель для анализа данной проблемы 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 [9, 10]. 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.

Уравнение динамики для трехмерного неоднородного элемента конструкции в системе координат x y z имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где σ_x , σ_y , σ_z – компоненты нормальных напряжений; τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} – компоненты касательных напряжений; u , v , w – компоненты перемещений; ρ – плотность материала; X , Y , Z – проекции массовых сил

Компоненты напряжений в уравнениях (1) определяются в зависимости от стадии деформирования

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

где ε_x , ε_y , ε_z – компоненты нормальных деформаций; γ_{xy} , γ_{xz} , γ_{yz} – компоненты касательных деформаций.

В случае упругих деформаций $\psi = \frac{1}{2\mu}$ и зависимости (2) 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 $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$ [7, 9]. Эта зависимость представлена в общем виде графически на рис. 1. Хорошо видно влияние деформации $\dot{\varepsilon}$ на динамический предел упругости.

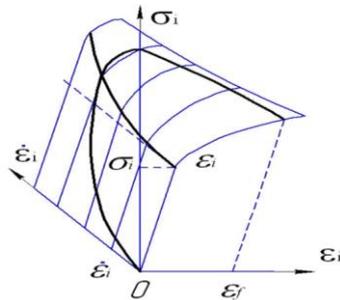


Рис. 1. Графическое представление зависимости $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$

На рис. 2 представлены некоторые зависимости относительного динамического предела упругости σ_{sd}/σ_s для ряда конструкционных материалов, полученные на основе экспериментальных данных [7]. На рис. 2 кривые соответствуют конструкционным материалам: 1 – сталь ЭИ 878 (X15H8A18), 2 – сталь X18H10T, 3 – сплав ОТ41, 4 – сталь ЭП410 (X15H5Д2Т), 5 – сплав АМг2М.

Видно что наибольшее влияние скорость деформации оказывает на стальные сплавы и меньшее на алюминиевые.

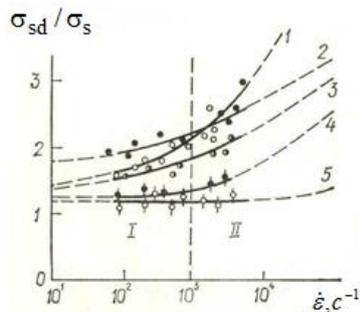


Рис. 2. Экспериментальные зависимости динамического предела упругости от скорости деформации

В области I эксперименты проводились в диапазоне скоростей $8 \cdot 10^1 - 6 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1}$, а в области II в

пределах $1,3 \cdot 10^2 - 3,5 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$. Установлено что выражение $\sigma_{sd}/\sigma_s = \left[1 - \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right]$ достаточно

точно описывает зависимость динамического предела упругости от скорости деформации. Значение коэффициентов D , n для различных материалов приведены в работе [7]. В общем

случае деформационное и скоростное упрочнение материала может быть описано в виде

$$\sigma_i = A \cdot \varepsilon_i^m \left[1 - \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right].$$
 Однако могут быть использованы и другие зависимости [1-5].

Зависимости для конечных деформаций и перемещений имеют вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right), \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right), \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right), \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial x} \right), \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} \right), \\ \gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

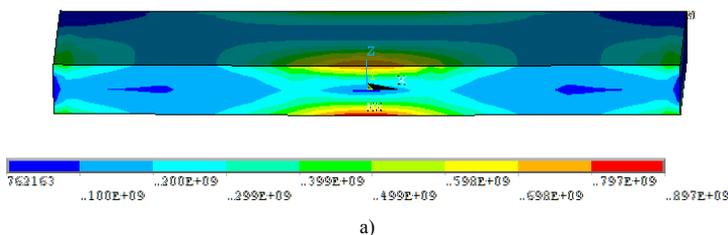
Аналогичные зависимости могут быть получены в цилиндрической системе координат.

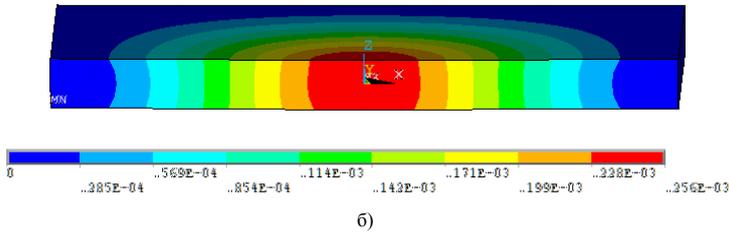
Задача решается вариантом метода конечных элементов, который учитывает специфику рассматриваемого процесса. Важным требованием к выбору типа конечных элементов является учет всех указанных факторов. Граничные условия в узлах элементов должны удовлетворять равенству как перемещений, так и производных.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

АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Численный анализ на основе метода конечных элементов позволяет определять распределение, величины и изменение во времени динамических перемещений, деформаций и напряжений при различных видах нагрузки [8-10]. Однако результаты численных расчетов существенно зависят от способа учета динамических свойств материала. Для сравнения рассматривается воздействие на прямоугольный элемент стальной конструкции толщиной $h = 8$ мм ударника массой $m = 0,1$ кг со скоростью 200 м/с при различных способах учета динамических свойств материала.

Попытка решать задачу в упругой постановке при увеличении интенсивности нагрузки приводит, как и следовало ожидать к завышению максимальных напряжений (до 800 МПа) при заниженной оценке перемещений (рис. 3).





б)

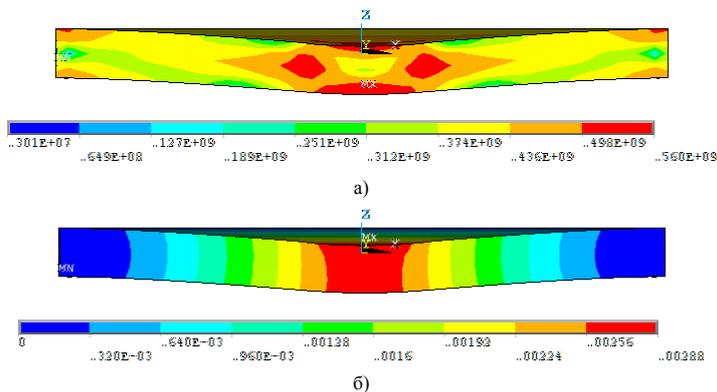
Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений а) и перемещений б) при воздействии ударника с учетом только упругих свойств материала

Используем учет динамических материала с помощью зависимости Пэжины [5]

$$\sigma_i = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i^{pl}}{\gamma} \right)^m \right] E \varepsilon_i, \quad (4)$$

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

При этом наблюдается снижение наибольших эквивалентных напряжений (500 МПа) и увеличение перемещений, кроме того меняется характер распределения эквивалентных напряжений (рис. 4).



а)

б)

Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений а) и перемещений б) при воздействии ударника с учетом динамических свойств материала согласно зависимости (4)

Данная модель может быть уточнена за счет учета конечных деформаций и увеличения числа степеней свободы в узлах. В этом случае величина максимальных эквивалентных напряжений еще более снижается (350 МПа), а величина перемещений увеличивается (рис. 5).

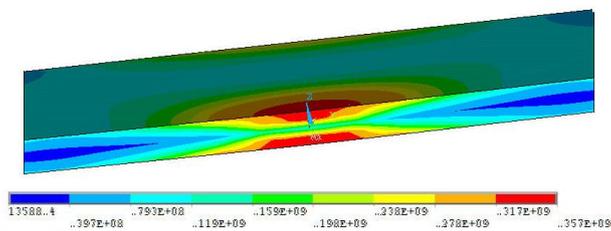


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений при воздействии ударника с учетом динамических свойств материала согласно зависимости (4)

Динамические свойства материала могут быть учтены в несколько иной форме с помощью зависимости Пирса [4].

$$\sigma_i = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i^{pl}}{\gamma} \right)^m \right] E \varepsilon_i. \quad (5)$$

В этом случае также учитываются конечные перемещения и большое число степеней свободы в узлах (рис. 6).

При разгрузке наблюдается резкое снижение уровня напряжений и перераспределение динамического напряженно-деформированного состояния (рис. 7).

Видно, что по мере уточнения упругопластических и динамических свойств материала, а также конечных деформаций всё более проявляется нелинейный характер деформирования с увеличением перемещений и деформаций при более низких значениях напряжений.

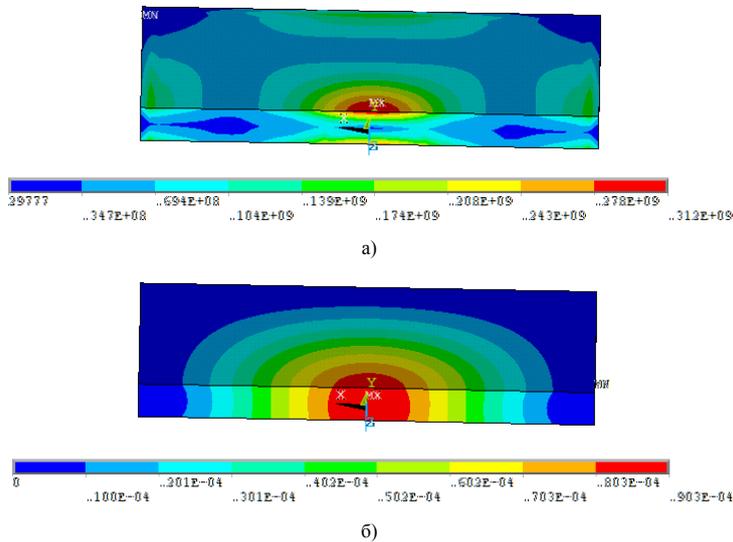


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений а) и перемещений б) при воздействии ударника с учетом динамических свойств материала согласно зависимости (5)

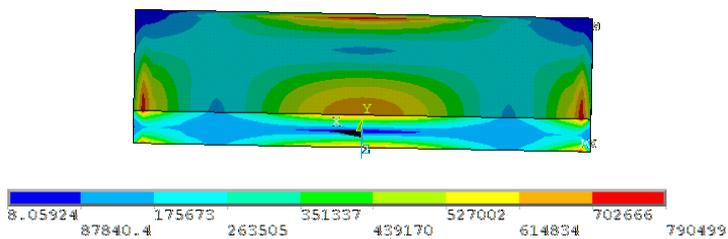


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений при разгрузке с учетом динамических свойств материала согласно зависимости (5)

Представляет интерес исследование напряженно-деформированного состояния элементов легких конструкций, которые должны обладать необходимой динамической прочностью при

заданной толщине и весе. Для сравнения рассматриваются элементы из различных материалов: стали, алюминиевого сплава, композита (рис. 8-10).

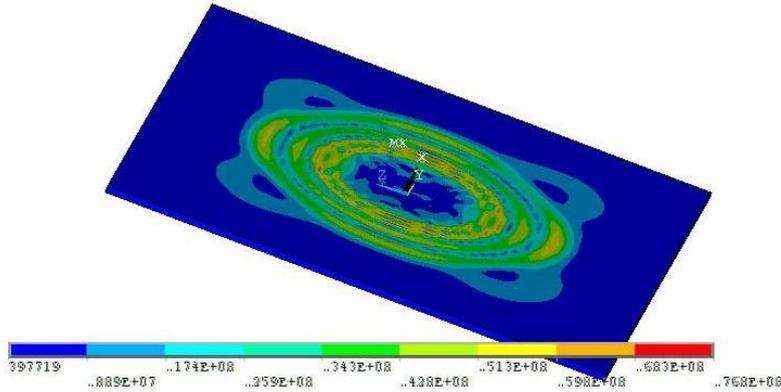


Рис. 8. Максимальные эквивалентные напряжения в плоском стальном элементе при воздействии ударника со скоростью 200 м/с

Так на рис 8 приводятся максимальные эквивалентные напряжения в плоском стальном элементе при воздействии ударника массой 200 г и скоростью 200 м/с. Стальной элемент имеет плотность $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости $E = 2,06 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$, модуль упрочнения $E_1 = 7,39 \cdot 10^8 \text{ Па}$. На рис. 9 показаны распределения максимальных эквивалентных напряжений в плоском элементе из алюминиевого сплава при воздействии ударника массой 200 г и скоростью 200 м/с. Элемент из алюминиевого сплава имеет плотность $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости $E = 7,1 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,33$, модуль упрочнения $E_1 = 7,24 \cdot 10^7 \text{ Па}$.

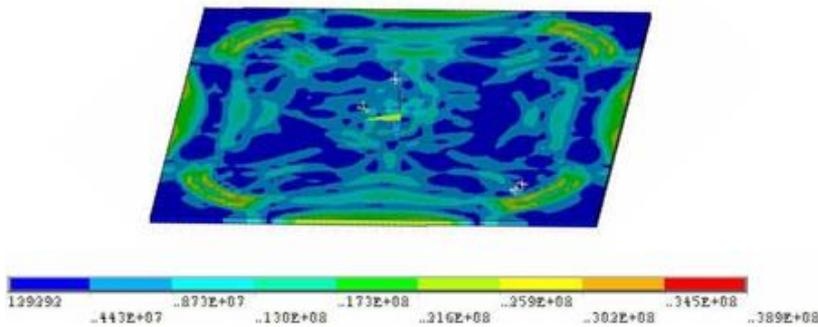


Рис. 9. Максимальные эквивалентные напряжения в плоском элементе из алюминиевого сплава при воздействии ударника со скоростью 200 м/с

На рис. 10 показаны максимальные эквивалентные напряжения в композитном элементе. Свойства материала: плотность $\rho = 2400 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости $E = 5,4 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,4$, модуль упрочнения $E_1 = 7,99 \cdot 10^8 \text{ Па}$.

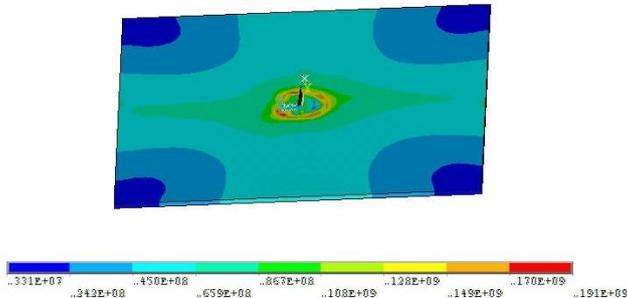


Рис. 10. Максимальные эквивалентные напряжения в плоском композитном элементе при воздействии ударника со скоростью 200 м/с

Сопоставление результатов исследований показывает, что необходимой прочностью и наименьшим весом обладают элементы из улучшенного композитного материала.

На основе уточненных зависимостей свойств материала определялось изменение динамического напряженно-деформированного состояния в трубе газопровода при увеличении локальной ударной нагрузки суммарным импульсом I_1 . Радиус трубы 0,5 м, толщина 0,01 м, длина 5,5 м. На рис. 11 приведены сравнения численных (кривые) и экспериментальных (точки) результатов для осевых (кривая 1) и окружных (кривая 2) напряжений [7]. Видно влияние пластических и динамических свойств материала и нелинейный характер деформирования по мере увеличения нагрузки. Пунктирная линия показывает ограничения упругой постановки задачи.

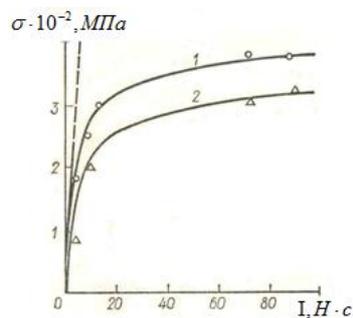


Рис. 11. Изменение осевых (1) и окружных (2) напряжений в трубе при увеличении ударной нагрузки

ВЫВОДЫ

Динамические свойства материала оказывают существенное влияние на развитие процесса скоростного упругопластического деформирования элементов конструкций при интенсивных ударных нагрузках. Решение задачи в упругой постановке возможно лишь при малых скоростях и низком уровне нагрузки, когда $\left(\frac{\dot{\epsilon}_i}{D}\right)^{1/n} \ll 1$. При разгрузке наблюдается различие в характере напряженно-деформированных состояний, так процесс разгрузки начинается в различных стадиях напряженно-деформированного состояния.

При выборе достаточно адекватных упругопластических и динамических характеристик материала можно достичь достоверных результатов что позволяет правильно оценить допустимые ударные нагрузки или динамическую прочность элементов конструкций. Следует стремиться к сопоставлению результатов, полученных при использовании

различных способов учета динамических свойств материала. Это позволяет повысить достоверность численных расчетов. В любом случае многовариантные численные исследования позволяют выявить характер упругопластического скоростного деформирования элементов конструкций и обеспечить их динамическую прочность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Johnson G. R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains high strain rates and high temperatures / G. R. Johnson, W. H. Cook / *The 7th International Symposium on Ballistics*. Hague, Netherlands. – 1983.
2. Kruczka L. New application of the Hopkinson pressure bar technique to determining dynamic behavior of materials / L. Kruczka, W.K. Novacki // *Mechanica Teoretychna i Stosovna*. – V. 2. – №34. – 1996. – P. 259-280.
3. Meyers M. A. *Dynamics behavior of materials* / M.A. Meyers. – New York : Wiley, 1994. – 283 p.
4. Peirce D. A model for large deformations of elasto-viscoplastic solids at finite strains / D. Peirce and D.R.J. Owen // *Computational issues, Finite Inelastic Deformations : Theory and applications*, Springer-Verlag, Berlin. – 1992.
5. Пежина П. Основные вопросы вязкопластичности / П. Пежина. – М. : Мир, 1968. – 175 с.
6. Трощенко В. Т. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения / В.Т. Трощенко, А.А. Лебедев, В.А. Стрижало и др. – К. : Логос, 2000. – 571 с.
7. Воробьев Ю. С. Скоростное деформирование элементов конструкций / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодяжный, В.И. Севрюков, Е.Г. Янютин. – К. : Наук. думка, 1989. – 192 с.
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*, Sevastopol, Ukraine. – June 19-22, 2013 – P. 351-357.
9. Vorobiov Iu. S. 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.
10. Воробьев Ю. С. Динамика элементов конструкций при ударных нагрузках / Ю.С. Воробьев, Н.Ю. Овчарова // *Вибрации в технике и технологиях*. – Львов, 2014. – № 2(74). – С. 5-11.

REFERENCES

1. Johnson, G.R. and Cook, W.H. (1983), "A constitutive model and data for metals subjected to large strains high strain rates and high temperatures", *The 7th International Symposium on Ballistics*, Hague, Netherlands.
2. Kruczka, L. and Novacki, W.K. (1996), "New application of the Hopkinson pressure bar technique to determining dynamic behavior of materials", *Mechanica Teoretychna i Stosovna*, vol. 2, no. 34, pp. 259-280.
3. Meyers, M.A. (1994), "Dynamics behavior of materials", Wiley, New York.
4. Peirce, D. and Owen, D.R.J. (1992), "A model for large deformations of elasto-viscoplastic solids at finite strains", *Computational issues, Finite Inelastic Deformations: Theory and applications*, Springer-Verlag, Berlin.
5. Pezhina, P. (1968), *Osnovnyye voprosy vyazkoplachnosti* [Basic questions of viscoplasticity], Mir, Moscow.

6. Troshchenko, V.T., Lebedev, A.A., Strizhalo, V.A. i dr. (2000), *Mekhanicheskoye povedeniye materialov pri razlichnykh vidakh nagruzeniya* [Mechanical behavior of materials at the different types of lading], Logos, Kiev.
7. Vorob'yev, YU.S., Kolodyazhnyy, A.V., Sevryukov, V.I. and Yanyutin, Ye.G. (1989), *Skorostnoye deformirovaniye elementov konstruksiy* [Speed deformation of elements of constructions], Nauk. dumka, Kiev.
8. Vorobiov, Y., Ovcharova, N. and Kruszka, L. (2013), "Nonlinear deformations of structures cylindrical element under local shock", *Proceedings of the 4th International Conference on Nonlinear Dynamics ND-KhPI2013*, pp. 351-357.
9. Vorobiov, Iu.S., Kruszka, L. and Ovcharova, N.Y. (2013), "Finite Element Analysis of Local Shock Loading on Structures Cylindrical Elements", *Proceedings of The 8th International Symposium on Impact Engineering (ISIE2013)*, pp. 499-504.
10. Vorob'yev, YU.S. and Ovcharova, N.YU. (2014), "Dinamika elementov konstruksiy pri udarnykh nagruzkakh", *Vibratsii v tekhnike i tekhnologiyakh*, no. 2(74), pp. 5-11.

УДК 539.3:629.7

ДИНАМИКА КОМПРЕССОРНОГО ЛОПАТОЧНОГО АППАРАТА В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ПОТОКЕ

¹Воробьев Ю. С., ¹Овчарова Н. Ю., ¹Кулаков П. Н., ²Кулишов С. Б., ²Скрицкий А. Н.

¹Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины,
ул. Дм. Пожарского, 2/10, Харьков, 61046, Украина

²ГП НПКГ «Зоря»–«Машипроект»,
просп. Октябрський, 42-а, Николаев, 54018, Украина

vorobiev@ipmach.kharkov.ua, spe@machprojekt.nikolaev.ua

Рассматриваются колебания лопаток рабочих колес компрессора ГТД в газодинамическом потоке на основе трехмерных конечно-элементных моделей. Проводится расчет параметров газодинамического потока в проточной части компрессора. Выделяются системы отдельных ступеней, для которых проводится уточненный расчет. На основе результатов расчета газодинамических возмущающих сил анализируются поля динамических перемещений и напряжений на поверхности лопаток и возбудимость различных форм колебаний. Выявляются опасные режимы работы рабочих лопаток компрессора.

Ключевые слова: компрессорные лопатки, газодинамический поток, трехмерные модели, возмущающие нагрузки, МКЭ, вибрационные напряжения.

ДИНАМІКА КОМПРЕССОРНОГО ЛОПАТОЧНОГО АПАРАТУ В ГАЗОДИНАМІЧНОМУ ПОТОЦІ

¹Воробйов Ю. С., ¹Овчарова Н. Ю., ¹Кулаков П. М., ²Кулішов С. Б., ²Скрицький А. Н.

¹Інститут проблем машинобудування ім. А.Н. Підгорного НАН України,
вул. Дм. Пожарського, 2/10, Харків, 61046, Україна

²ДП НВКГ «Зоря»–«Машипроект»,
просп. Жовтневий, 42-а, Миколаїв, 54018, Україна

vorobiev@ipmach.kharkov.ua, spe@machprojekt.nikolaev.ua

Розглядаються коливання лопаток робочих коліс компресора ГТД у газодинамічному потоці на основі тривимірних скінчено-елементних моделей. Проводиться розрахунок параметрів газодинамічного потоку в проточній частині компресора. Виділяються системи окремих ступенів, для яких проводиться уточнений

Фізико-математичні науки