

УДК 539.3

**Ю.С. Воробьев, профессор, д-р техн. наук,
М.В. Чернобрышко, ст. научный сотр., канд. техн. наук,
В.Н. Романенко, главный инженер-исследователь,
Н.Ю. Овчарова, инженер I категории**

*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины,
ул. Дм. Пожарского, 2/10, Харьков, Украина, 61046,
E-mail: Vorobiev@ipmash.kharkov.ua*

ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассмотрены динамические процессы в конструктивных элементах техники и сооружений под действием нестационарных, вибрационных, ударных и ударно-волновых нагрузок. Используются трехмерные модели, методы конечных разностей и конечных элементов. Учитываются конечные упругопластические деформации и динамические свойства материалов. Приведены результаты анализа динамического напряженно-деформированного состояния элементов реальных конструкций под действием нестационарных нагрузок.

Ключевые слова: динамическое напряженно-деформированное состояние, упругопластические деформации, трехмерные модели, нестационарные нагрузки, ударно-волновые нагрузки.

Введение

Ряд современных объектов техники и сооружений испытывает при эксплуатации действие интенсивных нестационарных нагрузок. Такими объектами являются элементы авиационно-космической техники, машиностроения, наземного и водного транспорта, инженерных сооружений и др. Локальные кратковременные нагрузки даже не ведущие к непосредственному разрушению или повреждению объектов оказывают существенное влияние на их дальнейшую эксплуатацию. Особенностью возникающих при этом динамических процессов является трехмерное напряженно-деформированное состояние, упругопластические конечные деформации в ограниченной области и изменение свойств материалов в зависимости от величины и скорости деформации. Все это приводит к необходимости при численном анализе использовать трехмерные модели, динамическую теорию пластических деформаций и характеристики динамических свойств материала.

Целью исследования является численный анализ динамического напряженно-деформированного состояния элементов конструкций под действием нестационарных, вибрационных, ударных и ударно-волновых нагрузок и выявление опасных режимов эксплуатации.

1. Постановка задачи и математические модели

Основные уравнения движения в трехмерной постановке имеют вид:

$$\begin{aligned}(\lambda + \mu) \frac{\partial \Theta}{\partial x} + \mu \Delta u - 3\alpha K \frac{\partial T}{\partial x} &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\(\lambda + \mu) \frac{\partial \Theta}{\partial y} + \mu \Delta v - 3\alpha K \frac{\partial T}{\partial y} &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\(\lambda + \mu) \frac{\partial \Theta}{\partial z} + \mu \Delta w - 3\alpha K \frac{\partial T}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2},\end{aligned}\tag{1}$$

где u, v, w – компоненты перемещений; T – температура; λ, μ – параметры Ламе; ρ – плотность материала; α – коэффициент теплового расширения; $K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ – модуль объемного сжатия;

$\Theta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div} U$ – относительное объемное расширение. Для несжимаемого материала $\Theta = 0$.

Компоненты вектора перемещений, найденные согласно соотношений (1), позволяют определить компоненты тензора деформаций в нелинейном виде в декартовой системе координат

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

В соотношениях (2) полная деформация может быть представлена в виде суммы ее упругой и пластической частей $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p$, где ε_{ij}^e – упругая часть полной деформации; ε_{ij}^p – пластическая часть полной деформации.

В общем случае в декартовой и, аналогично, в цилиндрической системах координат компоненты тензора напряжений определяются из соотношений динамической деформационной теории [1] согласно системе уравнений

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} - \sigma_0 &= \frac{2\sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, T)}{3\varepsilon_i} (\varepsilon_{xx} - \frac{1}{3}\varepsilon_0), \\
\sigma_{yy} - \sigma_0 &= \frac{2\sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, T)}{3\varepsilon_i} (\varepsilon_{yy} - \frac{1}{3}\varepsilon_0), \\
\sigma_{zz} - \sigma_0 &= \frac{2\sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, T)}{3\varepsilon_i} (\varepsilon_{zz} - \frac{1}{3}\varepsilon_0), \\
\tau_{xy} &= \frac{\sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, T)}{3\varepsilon_i} \gamma_{xy}, \\
\tau_{yz} &= \frac{\sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, T)}{3\varepsilon_i} \gamma_{yz}, \\
\tau_{zx} &= \frac{\sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, T)}{3\varepsilon_i} \gamma_{zx},
\end{aligned} \tag{3}$$

где $\sigma_0 = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})$ – среднее значение напряжений.

Исследования показали целесообразность использования в (3) модифицированного уравнения состояния в виде [2]

$$\sigma_i = \sigma_s \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right] + \sigma_s \left\{ \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_s} - \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \right\}^m \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_k}{T_p - T_k} \right)^r \right], \tag{4}$$

где m, r – константы, определяемые из эксперимента, описывающие динамические свойства материала; T_k – температура, при которой проводилось определение характеристик материала; T_p – температура плавления.

Часть задач решается адаптивным методом конечных разностей, который позволяет учитывать изменяющиеся во времени динамические свойства материала в локальных областях конструктивных элементов. Задача отличается особенностями динамического деформирования элементов конструкций. Они состоят в том, что в отдельных зонах приложения локальных нагрузок возникают большие градиенты перемещений и деформаций. При удалении от зоны приложения нагрузки величины деформаций и напряжений резко падают, а перемещения не имеют больших градиентов.

Импульсные нагрузки резко меняются во времени, и градиенты напряжений и величины деформаций и напряжений также резко меняются во времени. При этом возникают изменяющиеся в пространстве и времени зоны пластических и упругих деформаций, требующих учета также динамических характеристик материала. Поэтому не целесообразно создавать сетку одного порядка во всей рассматриваемой области, как по пространственным, так и по временным координатам. По этой же причине вместо использования разностей высоких порядков более рационально создавать сетку, адаптирующуюся к условиям деформаций и функций состояния материала в данный момент. Также ситуация намного усложняется необходимостью учитывать изменение свойств материала во времени и по пространственным координатам в зависимости от величины и скорости деформаций. В связи с изложенными особенностями задачи проводится пошаговая линеаризация существенно нелинейной задачи при прогнозировании и коррекции величины каждого шага в пространстве и во времени.

Ряд задач оказывается удобно решать с помощью метода конечных элементов, учитывающего особенности скоростного деформирования материалов. Этот метод обеспечивает хорошую визуализацию результатов. Используются трёхмерные конечные элементы. Модель материала учитывает динамические свойства материала. Динамическое упрочнение материалов отражает зависимости интенсивностей напряжений от интенсивностей деформаций и скоростей деформаций $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$. В данном случае используются зависимости типа Пэжины.

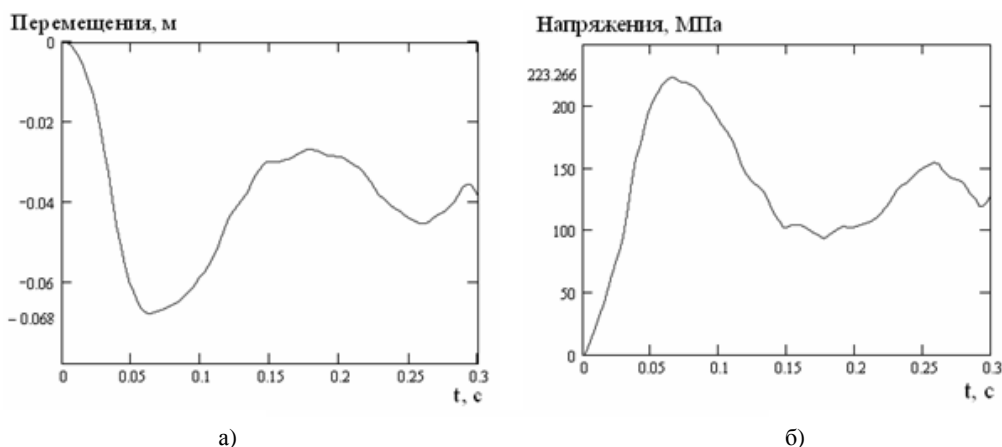
$$\sigma_i = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i^{pl}}{\gamma} \right)^m \right] E \varepsilon_i, \quad (5)$$

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

Методы конечных разностей и конечных элементов дополняют друг друга при решении указанных задач.

2. Результаты численного анализа

В качестве примера рассматривается поведение элемента платформы под действием ударно-волновой нагрузки. На вертикальную стенку из железобетона действует волновая гидродинамическая нагрузка. Величина давления $P = 16667h$ Па, где h – глубина жидкости, которая является характерной для волновой нагрузки. Расчеты, проведенные с помощью адаптивного метода конечных разностей, показывают существенную зависимость деформаций плиты от глубины протекания процесса (рисунок 1). На рисунке 1 представлены перемещения и интенсивности напряжений для глубины $h = 3$ м. Абсолютные значения этих величин превысили значения, полученные при расчете импульсного деформирования плиты, что позволяет сделать вывод об опасности ударно-волновой нагрузки.

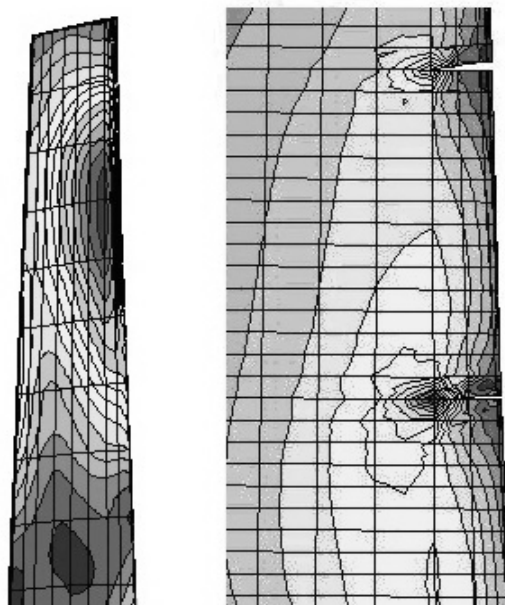
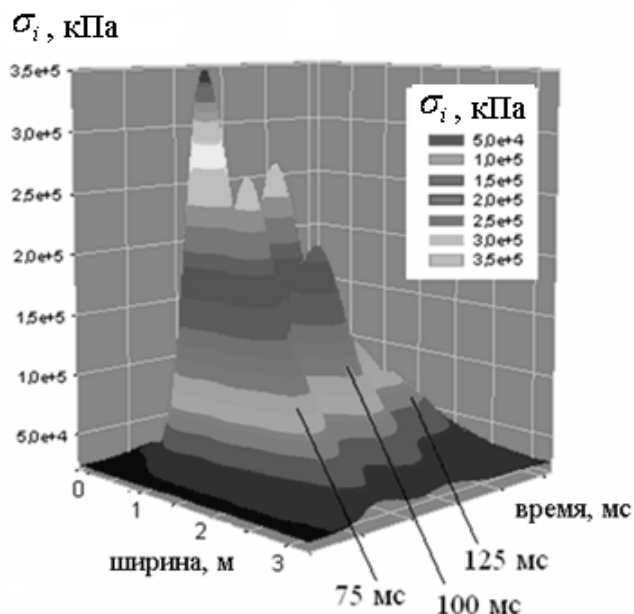


а) б)
Рисунок 1 – Перемещения (а) и интенсивность напряжений (б)
при гидродинамической нагрузке для глубины $h = 3$ м

На рисунке 2 приведены результаты анализа развития процесса динамического деформирования в плите под действием ударно-волновой нагрузки. Видно локализация НДС в пространстве и во времени и волновой характер деформационного процесса.

Рассматривались эрозионные повреждения лопаток последней ступени мощной паровой турбины. Сочетание эрозионного воздействия и вибрации лопаток приводит к существенному росту

інтенсивностей напружень. Аналіз колибаний таких лопаток виконан с помощью использования трехмерных конечно-элементных моделей. На рисунке 3 показано локализация интенсивностей вибрационных напряжений в периферийной части лопатки, где наблюдались наибольшие эрозионные повреждения.



В некоторых лопатках последних влажно-паровых ступеней турбин используются продольные вырезы для отвода влаги. Распределение интенсивностей напряжений в таких ступенях показано на рисунке 4.

Анализ воздействия локальных ударных нагрузок, необходим при оценке динамической прочности технологических камер, боксов и корпусов современных двигателей, особенно газотурбинных. Использование трехмерных конечно-элементных моделей, учитывающее скоростные упругопластические деформации и динамические свойства материалов [3], позволяет провести численный анализ возникающих при этом процессов. Рисунок 5 показывает деформацию и распределение интенсивностей напряжений в цилиндрическом элементе конструкции при воздействии ударника массой 0,1 кг со скоростью 1000 м/с. Хорошо виден упругопластический характер деформаций.

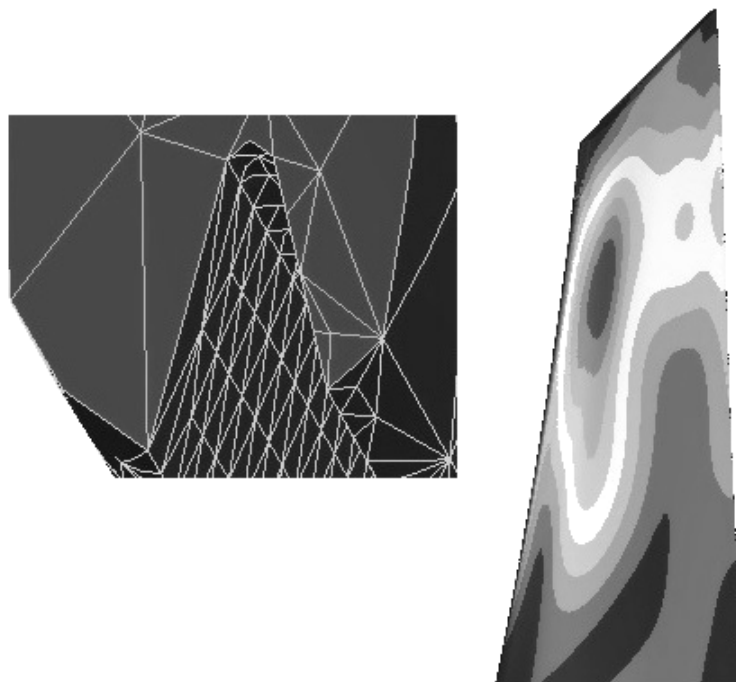


Рисунок 4 – Конечноэлементная модель выреза в периферийной части лопатки (слева) и распределение интенсивностей напряжений в области выреза (справа)

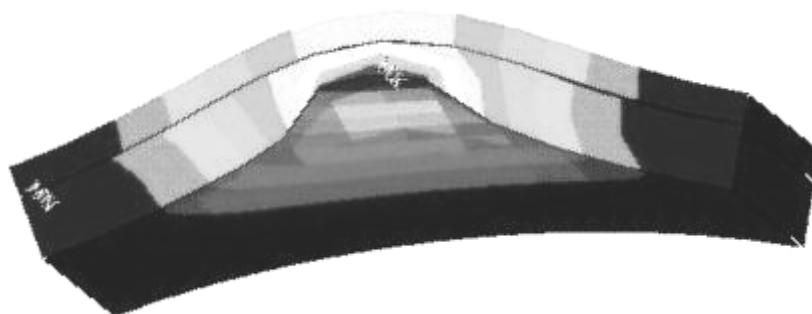


Рисунок 5 – Распределение деформаций и интенсивностей напряжений

Все задачи доводятся до определения интенсивностей напряжений. Это позволяет сделать выводы о величине деформаций и напряжений и как следствие о возможных повреждениях конструкции.

Многовариантные расчеты и наглядность результатов позволяют выработать практические рекомендации по обеспечению динамической прочности ответственных элементов конструкции современной техники.

Для ряда практических задач, связанных с определением напряженно-деформированного состояния элементов конструкций под действием импульсных нагрузок механического характера, анализ изменения величины интенсивности напряжений во времени позволяет делать выводы о характере деформационного процесса и, как следствие, о возможных повреждениях. При анализе развития деформационного процесса в пластической стадии необходима проверка возможности появления трещин и разрушений. Для этого могут применяться различные критерии прочности. В частности использовался критерий Писаренко-Лебедева, поскольку этот критерий предполагает, что предельное состояние материала определяется и касательными, и нормальными напряжениями

$$\sigma_{\Pi} = \chi \sigma_i + \sigma_1(1 - \chi), \quad \chi = \sigma_P / \sigma_C. \quad (6)$$

Выводы

Использование трехмерных моделей, метода конечных разностей и конечных элементов позволяют провести численный анализ динамического напряженно-деформированного состояния элементов конструкций под действием вибрационных, ударных и ударно-волновых нагрузок.

Деформации и интенсивности напряжений при локальных ударных нагрузках развиваются в ограниченной области и быстро убывают во времени.

Авторы выражают благодарность Государственному фонду фундаментальных исследований Украины за финансовую поддержку проведенных исследований.

Библиографический список использованной литературы

1. Vorobyov Y. Strain rate deformation and damage of structural elements under local impulsive loadings / Y. Vorobyov, M. Chernobryvko, L. Kruszka // Proceedings Seventh International Symposium on Impact Engineering (ISIE2010), 4 - 7 July 2010. — Warsaw, Poland. — P. 679–686.

2. Чернобрывко М.В. Модель скоростного упругопластического деформирования элементов конструкций при импульсном нагружении / М.В. Чернобрывко // Вісник СевНТУ. Сер. Механіка, енергетика, екологія: зб. наук. пр. — Севастополь, 2012. — Вип. 133. — С. 21–26.

3. Учет свойств материалов при комплексных прочностных расчетах элементов современных конструкций / Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрывко, М.А. Чугай, В.Н. Романенко // Вісник СевНТУ. Сер. Механіка, енергетика, екологія: зб. наук. пр. — Севастополь, 2011. — Вип. 120. — С. 3–9.

Поступила в редакцию 27.02.2013 г.

Воробйов Ю.С., Чернобрывко М.В., Романенко В.Н., Овчарова Н.Ю. Задачі забезпечення динамічної міцності відповідальних елементів сучасних конструкцій

Розглянуті динамічні процеси в конструктивних елементах техніки та споруд під дією нестационарних, вібраційних, ударних та ударно-хвильових навантажень. Використовуються тривимірні моделі, методи скінченних різниць та скінченних елементів. Враховуються скінченні пружно-пластичні деформації та динамічні властивості матеріалів. Наведено результати аналізу динамічного напружено-деформованого стану елементів реальних конструкцій під дією нестационарних навантажень.

Ключові слова: динамічна міцність, напружено-деформований стан, тривимірні моделі, нестационарні, ударно-хвильові навантаження.

Vorobiov Yu. S., Chernobryvko M.V., Romanenko V.N., Ovcharova N.Yu. Problems of providing of dynamics strength of responsibility of modern constructions elements

Dynamic processes are considered in the structural elements of technique and buildings under the action of non-stationary, vibration, shock and shock-wave loadings. Three-dimensional models, methods of finite differences and finite elements are used. Finite elastic-plastic deformations and dynamic properties of materials are taken into account. Analysis results of dynamic stress-strain state of the real constructions elements under non-stationary loadings are discussed.

Keywords: dynamic strength, stress-strain state, three-dimensional models, non-stationary, shock wave loadings.