

УДК 539.3

Ю.С. ВОРОБЬЕВ, М.В. ЧЕРНОБРЫВКО

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

## ДИНАМИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛОПАТКИ ПРИ УДАРЕ ПО ВХОДНОЙ КРОМКЕ

Изложена методика определения напряженно-деформированного состояния (НДС) в локальной зоне входной кромки лопатки компрессора в результате воздействия ударно-импульсной нагрузки. Математическая модель задачи учитывает динамическое упрочнение материала в процессе скоростного деформирования и развитие зоны пластических деформаций во времени. Численные исследования проводятся на основе адаптивных конечно-разностных методов. Сопоставление расчетных данных НДС лопатки с динамическим пределом текучести дает возможность прогнозирования степени повреждений.

**Ключевые слова:** ударно-импульсная нагрузка, входная кромка лопатки, скоростное деформирование, динамическое упрочнение материала.

## Введение

Ряд предыдущих исследований [1 – 5] посвящены изучению воздействия на лопатку и элементы корпуса ГТД локального удара материальным телом в произвольную центральную зону. Показана локализация напряженно-деформированного состояния в зоне ударного воздействия. Изложена методика определения степени повреждения лопатки.

Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие результаты теоретического анализа воздействия локальной ударной нагрузки на элементы конструкций [6 – 7].

Теоретико-экспериментальные исследования [8] показывают, что динамические напряжения при локальном ударе даже телом малой массы могут превышать динамический предел текучести материала, а иногда и динамический предел прочности. Как результат – повреждения, влияющие на дальнейшую безаварийную эксплуатацию лопаток.

Однако следует заметить, что вопрос влияния ударно-импульсной нагрузки на входную кромку лопатки компрессора остается открытым, поэтому целесообразно более детальное исследование динамического напряженно-деформированного состояния в зоне удара с учетом динамических свойств материала.

## 1. Постановка задачи

Рассматривается фрагмент лопатки вблизи входной кромки, представляющий собой трехмерную зону, размеры которой значительно превышают размеры тела, совершающего локальный контактный удар по поверхности лопатки с силой  $P(t)$  (рис. 1).

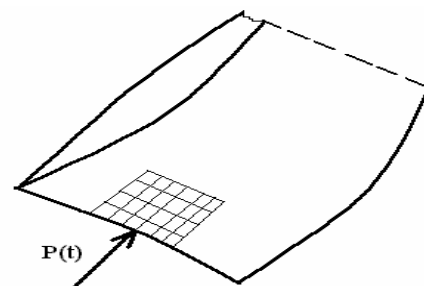


Рис. 1. Фрагмент исследуемой зоны кромки

В областях упругих и пластических деформаций динамическое напряженно-деформированное состояние рассматривается как и в предыдущих работах [1 – 2] на основе деформационной теории пластичности.

## 2. Метод решения

Задача решается с применением адаптивных конечных разностей [9] по пространственным и временной координатам. Каждая пространственная координата связывается со временем следующим образом:

$$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{\lambda}{\Delta x} \left[ u(x + \Delta x, y, z, t + \Delta t) - u(x, y, z, t + \Delta t) \right] + \frac{1 - \lambda}{\Delta x} \left[ u(x + \Delta x, y, z, t) - u(x, y, z, t) \right];$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \approx \frac{\lambda}{(\Delta x)^2} \left[ u(x + \Delta x, y, z, t + \Delta t) - 2u(x, y, z, t + \Delta t) + u(x - \Delta x, y, z, t + \Delta t) \right] + \frac{1 - \lambda}{(\Delta x)^2} \left[ u(x + \Delta x, y, z, t) - 2u(x, y, z, t) + u(x - \Delta x, y, z, t) \right], \quad (1)$$

где  $\lambda$  – весовой множитель.

Это дает возможность построить конечно-разностную сетку с различными шагами по пространственным координатам и по времени  $\Delta t$ , что отражает различные градиенты перемещений по различным координатам. Оптимальный выбор шагов сетки по временной и пространственным координатам позволяет добиться устойчивости конечно-разностной схемы.

При решении задач динамического напряженно-деформированного состояния с высокими градиентами в ограниченной области целесообразно использовать переменные неравномерные разностные сетки, адаптированные к динамике изменения искомым функции. Выбор достаточно малого шага позволяет провести пошаговую кусочную линеаризацию существенно нелинейной задачи, не внося недопустимых погрешностей. На каждом шаге вычисляются интенсивности напряжений, и проводится контроль их величины. Если превышает динамический предел текучести  $\sigma_i \geq \sigma_{s \text{ din}}$ , того происходит переход от упругой стадии деформирования к пластической.

При развитии деформации в пластической стадии необходима также проверка возможности появления трещин и разрушений. Для этого используются критерии прочности.

Вычисления оказываются достаточно громоздкими, но при данном подходе они проводятся в ограниченной области по пространственным и временным координатам. Время процесса деформирования измеряется микросекундами.

В сущности, трехмерная область, в которой развиваются напряжения высокой интенсивности, рассматривается как многослойная неоднородная структура, в которой свойства материалов изменяются в пространстве и во времени. Это позволяет адекватно моделировать сложный процесс скоростного упругопластического деформирования.

### 3. Результаты численного анализа

Исследовалось напряженно-деформированное состояние локальной трехмерной области лопатки компрессора из титанового сплава с параметрами материала:  $E = 1,3 \cdot 10^{11}$  Па,  $E_1 = 10,07 \cdot 10^8$  Па,  $\sigma_s = 4,9 \cdot 10^8$  Па,  $\sigma_{s1} = 6,9 \cdot 10^8$  Па,  $D = 4,45 \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup>,  $n = 4,84$ ,  $m = 1$ . Воздействие частицы на лопатку рассматривалось при скорости соударения 150 м/с (рис. 2) и 200 м/с (рис. 3), максимальная амплитуда нагрузки 48 МПа и 63 МПа соответственно, коэффициентом затухания импульса  $10^6$  с<sup>-1</sup>.

Длительность импульса соответствовала величине  $10^{-5}$  с<sup>-1</sup>.

Анализ рис. 2 и 3, на которых приводятся результаты расчетов интенсивности напряжений в ограниченной зоне удара для граничного слоя входной кромки лопатки компрессора, позволяет сделать вывод о НДС. Очевиден рост исследуемой величины в зависимости от скорости соударения с частицей. Сопоставление результатов вычислений позволяет прогнозировать повреждения или трещины.

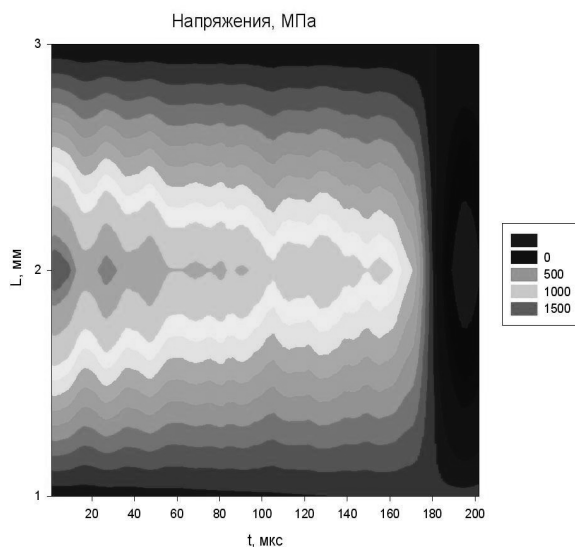


Рис. 2. Интенсивность напряжений в зоне удара при  $P = 48$  МПа

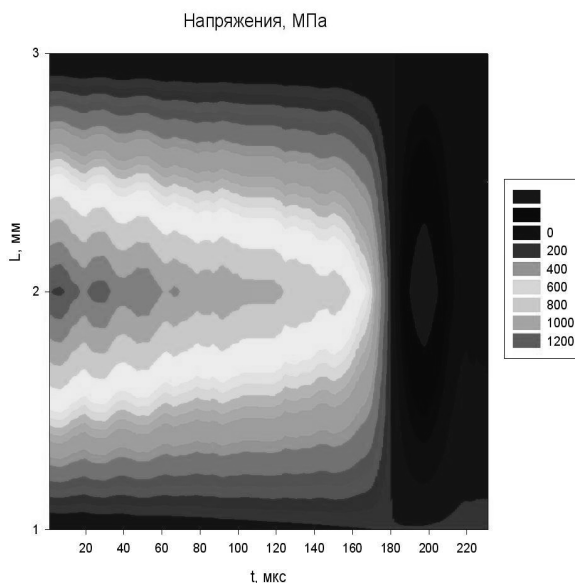


Рис. 3. Интенсивность напряжений в зоне удара при  $P = 63$  МПа.

### Заключение

Представленная методика определения НДС позволяет сделать вывод об уровне динамической напряженности в зоне удара по входной кромке лопатки компрессора и разработать практические рекомендации.

**Литература**

1. Воробьев Ю.С. Динамика лопатки компрессора при локальном импульсном воздействии / Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрышко // *Авиационно-космическая техника и технология* – 2007. – № 10(46). – С. 59-61.
2. Воробьев Ю.С. Воздействие локальных ударных нагрузок на лопатки турбомашин / Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрышко, Р. Жондковски // *Проблемы машиностроения*. – 2007. – Т. 10, № 5. – С. 27-31.
3. Воробьев Ю.С. Роль импульсных нагрузок для ГТД / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодяжный, М.В. Чернобрышко, Л. Крушка // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – Х.: ХАИ, 2002. – Вып. 34. – С. 136-140.
4. Воробьев Ю.С. Воздействие импульсных нагрузок на оболочечные элементы ГТД / Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрышко, Л. Крушка // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2003. – № 40/5. – С. 64-67.
5. Воробьев Ю.С. Локальное импульсное воздействие на оболочечные элементы конструкций / Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрышко, Л. Крушка // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 9(25). – С. 181-184.
6. Воробьев Ю.С. Нелинейное деформирование конструкций при локальном нагружении / Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрышко, А.В. Ярышко // *Механіка та машинобудування*. – 2007. – № 1. – С. 89-95.
7. Воробьев Ю.С. Проблемы анализа скоростного деформирования элементов конструкций при импульсном нагружении / Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрышко, А.В. Ярышко, Д.И. Степанченко, Н.Ю. Евченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 11(47). – С. 35-43.
8. Чернобрышко М.В. Нелинейные деформационные процессы при высокоскоростных испытаниях материалов // *Вестник ХНАДУ*. – Х.: ХНАДУ, 2007. – Вып. 38. – С. 140-142.
9. Лук'яненко С.О. Адаптивні обчислювальні методи моделювання об'єктів з розподіленими параметрами. – К.: Політехніка, 2004. – 234 с.

Поступила в редакцию 30.05.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Д.Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.

**ДИНАМІЧНИЙ НДС ЛОПАТКИ ПРИ УДАРІ ПО ВХІДНІЙ КРОМЦІ**

**Ю.С. Воробйов, М.В. Чернобрышко**

Викладено методику визначення напружено-деформованого стану (НДС) у локальній зоні вхідної кромки лопатки компресора в результаті впливу ударно-імпульсного навантаження. Математична модель задачі враховує динамічне зміцнення матеріалу в процесі швидкісного деформування й розвиток зони пластичних деформацій у часі. Чисельні дослідження проводяться на основі адаптивних кінцево-різницевих методів. Зіставлення розрахункових даних НДС лопатки з динамічною границею текучості дає можливість прогнозування ступеня ушкодження.

**Ключові слова:** ударно-імпульсне навантаження, вхідна кромка лопатки, швидкісне деформування, динамічне зміцнення матеріалу.

**DYNAMIC TDC BLADE AT IMPACT ON AN ENTRANCE EDGE**

**Yu.S. Vorobyov, M.V. Chernobryvko**

The technique of definition tensely-deformed conditions (TDC) in a local zone of an entrance edge blade the compressor is stated as a result of influence of impact-pulse loading. The mathematical model of a problem takes into account dynamic hardening a material during high-speed deformation and development of a zone of plastic deformations in time. Numerical researches are carried out on the basis of adaptive finite-difference methods. Comparison of settlement given TDC blade with a dynamic limit of fluidity enables forecasting of a degree of damages.

**Key words:** impact-pulse loading, entrance edge blade, high-speed deformation, dynamic hardening of a material.

**Воробьев Юрий Сергеевич** – д-р техн. наук, проф., зав. отделом, ИПМаш им. А.Н.Подгорного НАНУ, Харьков, Украина, e-mail: vorobiev@ipmach.kharkov.ua.

**Чернобрышко Марина Викторовна** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ИПМаш им. А.Н. Подгорного НАНУ, Харьков, Украина, e-mail: Chernobryvko@ipmach.kharkov.ua.