

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РЕКОНСТРУКЦИИ НЕОДНОРОДНЫХ ТЕЛ ЭЛЕМЕНТАРНЫМИ ОБЪЕМАМИ НА ПРИМЕРЕ КЕРАМИКИ С ДЕФЕКТАМИ МИКРОСТРУКТУРЫ

*М. О. Кибель, Н. Ю. Долганина*

Работа посвящена разработке системы реконструкции неоднородных тел элементарными объемами на примере керамики с дефектами микроструктуры. Система была спроектирована и реализована. Проведено тестирование системы. Данная система позволяет создавать модели керамических структур с учетом распределения дефектов, которые предназначены для суперкомпьютерного моделирования ударного нагружения керамики в пакете программ LS-DYNA.

*Ключевые слова:* броня, керамика, дефекты, микроструктура, метод конечных элементов, элементарный объем, моделирование.

### Введение

В настоящее время бронированная техника имеет, в основном, металлическую конструкцию (сталь, алюминиевые, титановые сплавы), что приводит к неоправданно высоким весовым показателям и необходимости иметь более мощные и тяжелые двигатели. Требования современного театра боевых действий заставляют разрабатывать легкие и скоростные транспортные средства с броней из керамики и полимерных волокнистых композитов [1, 2]. Однако количество варьируемых параметров при оптимизации защитной структуры исчисляется десятками [3–5], поэтому актуальной является разработка детализированных математических моделей деформирования и разрушения слоистых керамо-композитных структур для реализации конечно-элементных оптимизационных суперкомпьютерных вычислений.

Анализ современной литературы по механике разрушения неоднородных материалов показывает явную необходимость учета исходного состояния материала на микроуровне [1], т.е. учета дефектов структуры: распределения пор, включений и других несовершенств. Таким образом, многопараметричность моделей сплошной среды для керамики будет резко снижена за счет повышения «физичности и структурности» при отказе от гипотезы макросплошности. Перенос внимания на включение дефектов разного уровня в математические модели геометрии с упрощенным малопараметрическим описанием разрушения — мировой тренд численного анализа [6, 7].

Однако если для композитных материалов такой подход успешно применяется несколько лет [8–10], то в области моделирования керамических материалов есть всего несколько работ. Предлагаемые упрощенные аналитические модели [11] подходят только для первоначальных грубых оценок. Поэтому предлагается разработать систему реконструкции неоднородных тел элементарными объемами, где будет учтена микроструктура хрупкого керамического материала, полученные модели керамики будут использоваться при конечно-элементном моделировании процессов высокоскоростного удара на суперкомпьютере в пакете программ LS-DYNA.

Статья организована следующим образом. В разделе 1 приведена постановка задачи. В разделе 2 описывается реализация системы. В разделе 3 обсуждаются результаты исследований. В заключении суммируются основные результаты, полученные в данной работе.

## 1. Постановка задачи

### 1.1. Функциональные требования к системе

Система должна предоставлять пользователю графический интерфейс со следующими возможностями:

- ввод имени входного текстового файла с граничными условиями (координаты точек);
- выбор количества измерений модели (2D или 3D);
- ввод размера конечного элемента (в двухмерном случае в качестве формы конечного элемента берется квадрат, в трехмерном — куб);
- ввод процентного соотношения нескольких материалов (например, 20 %; 15 %; 5 %; 60 %). При генерации сетки конечных элементов каждому конечному элементу в модели случайным образом присваивается один из нескольких заданных материалов, в результате на выходе получается модель с распределенными случайным образом свойствами материалов по объему.

Система должна обеспечивать создание  $k$ -файла (входного файла для расчета в пакете программ LS-DYNA) с узлами и конечными элементами тела в 2D или 3D постановке, реконструированного в соответствии с выбранными параметрами.

### 1.2. Модульная структура системы

Система имеет модульную структуру:

- *Модуль распределения свойств* предназначен для распределения свойств материалов конечных элементов случайным образом по объему тела. Процентное соотношение материалов задано пользователем.
- *Модуль анализа координат границ* предназначен для обработки границ реконструируемого тела. Он выполняет следующие функции: считывание координат точек границы из входного файла; обработка границ; представление границ в системе.
- *Модуль построения сетки* предназначен для преобразования тела в набор конечных элементов. Он выполняет следующие функции: разбиение фигуры; анализ положения конечных элементов относительно границ фигуры.
- *Модуль вывода* предназначен для записи вычисленных координат узлов и конечных элементов в выходной  $k$ -файл. Данные в *модуль вывода* поступают из *модуля построения сетки* и *модуля распределения свойств*.

### 1.3. Взаимодействие между модулями

На рис. 1 представлена схема взаимодействия между модулями системы. Стрелками обозначены потоки данных от одного модуля к другому. Основная программа предоставляет пользователю интерфейс для ввода параметров вычисления. Эти параметры обрабатываются и передаются в *модуль распределения свойств* и *модуль анализа координат границ*, соответственно.

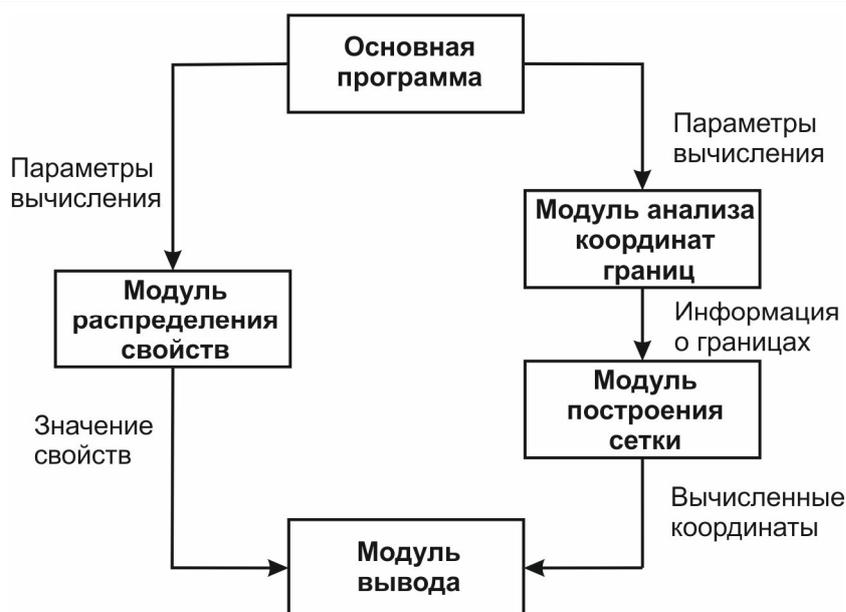


Рис. 1. Схема взаимодействия модулей системы

## 2. Реализация системы

Пользовательский интерфейс (рис. 2) представляет собой форму ввода данных, необходимых для реконструкции тела. Для работы с приложением пользователю необходимо ввести имя входного файла, выбрать необходимое количество измерений, внести размер конечного элемента и процентное соотношение материалов. После этого нажать кнопку «Вычислить» и система построит модель на основе введенных параметров.

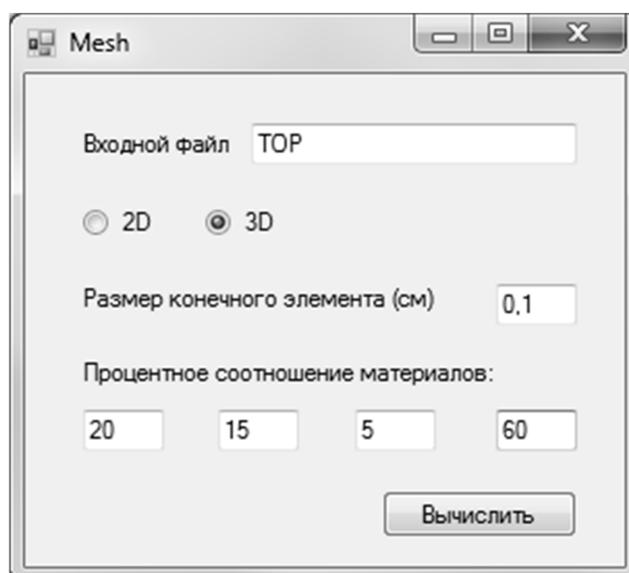


Рис. 2. Пользовательский интерфейс

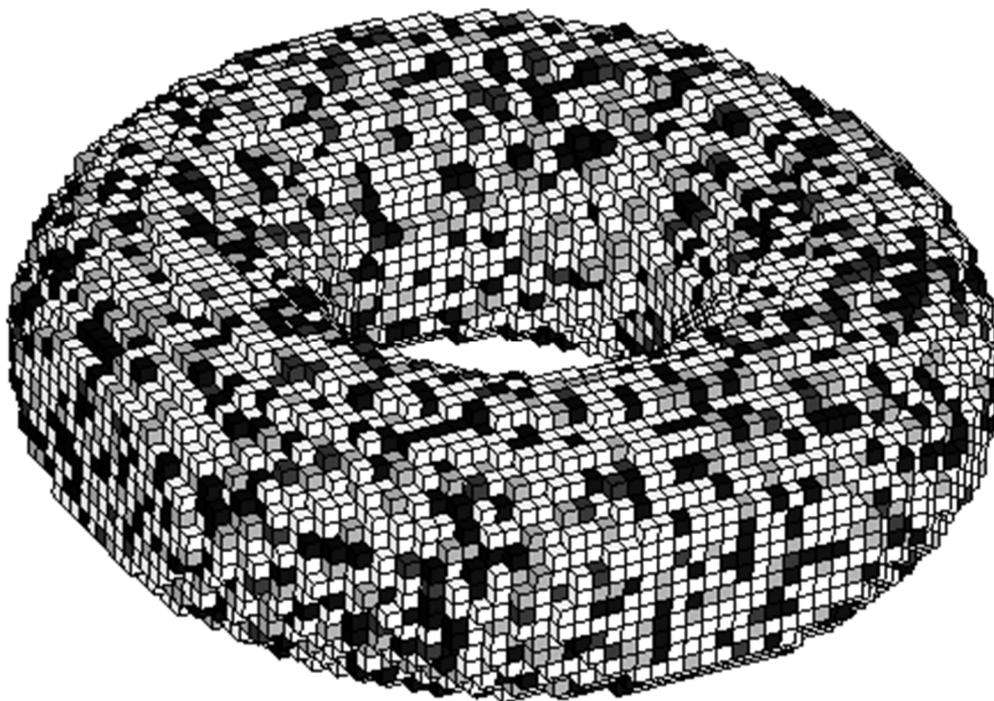
Алгоритм работы системы включает в себя следующие шаги:

1. Считывание координат границ из входного текстового файла. После считывания координаты записываются в vector (шаблон из стандартной библиотеки C++, реализующий динамический массив произвольного доступа), где с ними происходит дальнейшая обработка.

2. Обработка границ и представление их в системе в виде конечных элементов.
3. Вписывание тела в прямоугольник в двухмерном случае и в параллелепипед в трехмерном, на основе вычисленных крайних точек тела: минимумов и максимумов по каждой из осей.
4. Заполнение полученного параллелепипеда конечными элементами.
5. Определение принадлежности каждого конечного элемента реконструируемому телу. Для этого используется метод трассировки луча с учетом числа пересечений [12]. Из текущего конечного элемента выпускается луч по трем осям, по каждому подсчитывается число пересечений с границами, исходя из полученных данных, определяется положение конечного элемента относительно границ.
6. Удаление конечных элементов, не вошедших в тело.
7. Распределение свойств материалов конечных элементов.
8. Запись вычисленных узлов и конечных элементов в  $k$ -файл.

### 3. Результаты исследований

Для тестирования системы использовались различные выпуклые и невыпуклые двухмерные и трехмерные тела. На рис. 3 представлен один из тестов: разбиение тора на конечные элементы с процентным соотношением материалов 20 %, 15 %, 5 %, 60 %.



**Рис. 3.** Разбиение тора на конечные элементы с процентным соотношением материалов: 20 % (черный), 15 % (светло серый), 5 % (темно серый), 60 % (белый)

### Заключение

Разработана система реконструкции неоднородных тел элементарными объемами на примере керамики с дефектами микроструктуры. В ходе работы были решены следующие задачи: спроектирована и реализована система реконструкции неоднородных тел элементарными объемами, проведено тестирование системы на различных выпуклых и

невыпуклых двухмерных и трехмерных телах. Система позволяет создавать модели керамических структур с учетом дефектов. Полученные модели будут использоваться для суперкомпьютерного моделирования ударного нагружения керамики в пакете программ LS-DYNA.

*Исследование выполнено в Южно-Уральском государственном университете (национальном исследовательском университете) за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00327).*

## Литература

1. Hazell, P.J. Ceramic Armour: Design and Defeat Mechanisms / P.J. Hazell — Canberra: Argos Press, 2006. — 168 p.
2. Bhatnagar, A. Lightweight Ballistic Composites. Military and Law-Enforcement Applications / A. Bhatnagar — Cambridge: Woodhead publishing limited, 2006. — 429 p.
3. Krishnan, K. Numerical Simulation of Ceramic Composite Armor Subjected to Ballistic Impact / K. Krishnan, S. Sockalingam, S. Bansal, S.D. Rajan // Composites. — 2010. — Part B 41. — P. 583–593.
4. Feli, S. Finite Element Simulation of Ceramic/Composite Armor under Ballistic Impact / S. Feli, M.R. Asgari // Composites. — 2011. — Part B: Engineering, Vol. 42, Issue 4. — P. 771–780.
5. Bürgera, D. Ballistic Impact Simulation of an Armour-Piercing Projectile on Hybrid Ceramic/Fiber Reinforced Composite Armours / D. Bürgera, A.R. Fariab, S.F.M. Almeida, F.C.L. Melo, M.V. Donadon // International Journal of Impact Engineering. — 2012. — Vol. 43. — P. 63–77.
6. Swab, J.J. Advances in Ceramic Armor VII. A Collection of Papers Presented at the 35nd International Conference on Advanced Ceramics and Composites / J.J. Swab — Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. — 272 p.
7. Sapozhnikov, S.B. Ballistic Damage, Residual Strength and Repair of GFRP Plates / S.B. Sapozhnikov, M.V. Zhikharev // 1st International Conference for Advanced Marine Engineering (ICACME 2013). — Sept. 2013. — P. 28.
8. Долганина, Н.Ю. Проектирование новых конструкций тканевых бронепанелей с использованием суперкомпьютерных вычислений / Н.Ю. Долганина, С.Б. Сапожников // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математическое моделирование и программирование». — 2011. — № 37(254). — С. 71–81.
9. Долганина, Н.Ю. Исследование ударного взаимодействия индентора с тканевыми бронепластинами, расположенными на пластилиновом основании / Н.Ю. Долганина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Вычислительная математика и информатика». — 2012. — № 47(306). — С. 37–45.
10. Долганина, Н.Ю. Исследование влияния типа переплетения нитей на прочность тканевых преград при локальном ударе / Долганина Н.Ю., Сапожников С.Б. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение». — 2013. — № 2. — С. 95–104.
11. Сапожников, С.Б. Особенности разрушения пластины из хрупкого материала при взаимодействии с ударником / С.Б. Сапожников, О.А. Кудрявцев // Вестник Юж-

но-Уральского государственного университета. Серия «Математика. Механика. Физика». — 2012. — № 34(293). — С. 177–181.

12. Препарата, Ф. Вычислительная геометрия. Введение / Ф. Препарата, М. Шеймос — М.: Мир, 1989. — 478 с.

Кибель Мария Олеговна, магистрант, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Российская Федерация), mary.kibel@gmail.com.

Долганина Наталья Юрьевна, к.т.н., доцент кафедры системного программирования, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Российская Федерация), dolganinani@susu.ac.ru.

*Поступила в редакцию 5 августа 2014 г.*

---

*Bulletin of the South Ural State University  
Series “Computational Mathematics and Software Engineering”  
2014, vol. 3, no. 4, pp. 109–115*

---

DOI: 10.14529/cmse140408

## DEVELOPMENT SYSTEM FOR RECONSTRUCTION INHOMOGENEOUS BODIES BY ELEMENTARY VOLUMES ON THE EXAMPLE OF THE CERAMICS WITH DEFECTS OF MICROSTRUCTURE

*M.O. Kibel*, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation),

*N.Yu. Dolganina*, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

Work is devoted to the development a system for reconstruction inhomogeneous bodies by elementary volumes on the example of the ceramics with defects of microstructure. The system was designed and implemented. System testing was performed. This system allows to create models of ceramic structures with the defect distribution. The resulting models are designed for the supercomputer simulation shock loading of ceramics in the framework of the LS-DYNA software package.

*Keywords: armor, ceramics, defects, microstructure, finite element method, the elementary volume, modeling.*

### References

1. Hazell P.J. Ceramic Armour: Design and Defeat Mechanisms. Canberra: Argos Press, 2006. 168 p.
2. Bhatnagar A. Lightweight Ballistic Composites. Military and Law-Enforcement Applications. Cambridge: Woodhead publishing limited, 2006. 429 p.
3. Krishnan K., Sockalingam S., Bansal S., Rajan S.D. Numerical Simulation of Ceramic Composite Armor Subjected to Ballistic Impact // Composites. 2010. Part B 41. P. 583–593. DOI: 10.1016/j.compositesb.2010.10.001.

4. Feli, S., Asgari M.R. Finite Element Simulation of Ceramic/Composite Armor under Ballistic Impact // Composites. 2011. Part B: Engineering, Vol. 42, Issue 4. P. 771–780. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.01.024.
5. Bürgera D., Fariab A.R., Almeida S.F.M., Melo F.C.L., Donadonb M.V. Ballistic Impact Simulation of an Armour-Piercing Projectile on Hybrid Ceramic/Fiber Reinforced Composite Armours // International Journal of Impact Engineering. 2012. Vol. 43. P. 63–77. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.12.001.
6. Swab J.J. Advances in Ceramic Armor VII. A Collection of Papers Presented at the 35th International Conference on Advanced Ceramics and Composites. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. 272 p.
7. Sapozhnikov S.B., Zhikharev M.V. Ballistic Damage, Residual Strength and Repair of GFRP Plates // 1st International Conference for Advanced Marine Engineering (ICACME 2013). Sept. 2013. P. 28.
8. Dolganina N.Yu., Sapozhnikov S.B. Proyektirovaniye novykh konstruktsiy tkanevykh bronepaneliy s ispolzovaniyem superkompyuternykh vychisleniy [Design of New Constructions of Textile Armor Panel Using Supercomputing] // Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Matematicheskoye modelirovaniye i programmirovaniye» [Bulletin of the South Ural State University. Series «Mathematical Modelling, Programming & Computer Software»]. 2011. No. 37(254). P. 71–81.
9. Dolganina N.Yu. Issledovaniye udarnogo vzaimodeystviya indentora s tkanevymi broneplastinami, raspolozhennymi na plastilinovom osnovanii [Investigation of Impact Interaction of the Indenter with Fabric Armor Plate Which Located on the Clay Basis] // Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Vychislitelnaya matematika i informatika» [Bulletin of the South Ural State University. Series «Computational Mathematics and Software Engineering»]. 2012. No. 47(306). P. 37–45.
10. Dolganina N.Yu., Sapozhnikov S.B. Issledovaniye vliyaniya tipa perepleteniya nitey na prochnost tkanevykh pregrad pri lokalnom udare [Study of the Influence of Type Weave for Strength of the Textile Armor Panel at the Local Impact] // Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Mashinostroyeniye» [Bulletin of the South Ural State University. Series «Mechanical Engineering Industry»]. 2013. No. 2. P. 95–104.
11. Sapozhnikov S.B., Kudryavtsev O.A. Osobennosti razrusheniya plastiny iz khрупkogo materiala pri vzaimodeystvii s udarnikom [Aspects of Brittle Plate Fracture Due to Interaction with Indenter] // Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Matematika. Mekhanika. Fizika» [Bulletin of the South Ural State University. Series «Mathematics. Mechanics. Physics»]. 2012. No. 34(293). P. 177–181.
12. Preparata F., Sheymos M. Vychislitelnaya geometriya. Vvedeniye [Computational Geometry. Introduction]. M.: Mir, 1989. 478 p.

*Received August 5, 2014 г.*