

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ВОЙЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В БРОНЕЗАЩИТНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Н.Ю. Долганина, М.О. Кибель

Статья посвящена разработке численными методами моделей войлочных материалов, применяемых в бронезащитных элементах. Для создания сетки конечных элементов войлочных материалов разработан программный комплекс на языке C++, спроектирован и реализован, проведено тестирование. Программный комплекс позволяет создавать численные модели войлочного материала с прямолинейными волокнами, либо с искривленными волокнами по ломаной линии. Были созданы модели войлочных материалов, проведено суперкомпьютерное моделирование ударного нагружения войлочного материала из высокопрочных высококомодульных волокон в пакете программ LS-DYNA, проведено сравнение полученных данных с экспериментальными, получены графики ускорений.

Ключевые слова: численные методы, метод конечных элементов, суперкомпьютерное моделирование, войлок, волокно, броня

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Долганина Н.Ю., Кибель М.О. Разработка компьютерных моделей войлочных материалов, применяемых в бронезащитных элементах // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2016. Т. 5, № 2. С. 95–104. DOI: 10.14529/cmse160208.

Введение

Современные бронезащитные элементы имеют сложную структуру, они состоят из нескольких слоев различных материалов. Как правило, в качестве верхних слоев используют металлические или керамические элементы, а в качестве тыльных слоев используют тканые или нетканые (войлочные) материалы из высокопрочных высококомодульных волокон. Прочность тканых материалов при ударном нагружении зависит от размера бронезащитного элемента [1] в отличие от нетканых (войлочных) материалов. Поэтому в настоящее время в качестве тыльных слоев в бронезащитных элементах все чаще применяются войлочные материалы.

Войлочные материалы имеют сложную структуру и могут состоять из десятков тысяч отдельных волокон, хаотически расположенных по объему образца. Волокна в данных материалах могут быть относительно прямыми или искривленными.

Экспериментальное исследование поведения войлочного материала при высокоскоростном ударном нагружении, как правило, не позволяет определить влияние различных факторов на его работу [2]. Поэтому сегодня широко применяется компьютерное и суперкомпьютерное моделирование подобных задач с последующей экспериментальной проверкой полученных данных. Например, в работах [3–5] исследовано поведение войлочных материалов при растяжении, где войлок моделируют сплошной средой.

В настоящее время самый распространенный способ создания компьютерных моделей исследуемых объектов — это использование стандартных функций, имеющихся в САД/САЕ программах. Однако, в некоторых случаях данный подход не позволяет по-

строить необходимую модель, например, когда исследуемый объект имеет очень сложную геометрию. В данном случае исследователи разрабатывают собственные программы или подпрограммы. В работах [6–8] для создания сетки конечных элементов в пакете программ Magc авторами была написана подпрограмма для создания 2-D модели войлочного материала с прямолинейными волокнами и проведено исследование полученных моделей образцов на растяжение. Однако, войлочные материалы имеют 3-D структуру, которую необходимо учитывать при исследовании данных материалов при разных видах нагружения.

В статье описана разработка численными методами 3-D модели войлочных материалов, применяемых в бронезащитных элементах, для расчета в пакете программ LS-DYNA. Для генерации сетки конечных элементов написан программный комплекс на языке C++, с помощью разработанного программного комплекса создана модель войлочного материала (Twaron® felt #9, баллистический войлок), рассчитан процесс высокоскоростного удара на суперкомпьютере в пакете программ LS-DYNA, проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, получены графики ускорения.

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

1. Постановка задачи

Создание вручную модели войлочного материала является чрезвычайно сложной задачей, поэтому для разработки 3-D моделей войлочных материалов был создан программный комплекс, который позволяет генерировать сетку конечных элементов. Функциональные требования к данному программному комплексу заключаются в том, что он должен предоставлять пользователю возможность выбрать один из двух графических интерфейсов: первый интерфейс для создания войлочного материала с прямолинейными волокнами, а второй интерфейс для создания войлочного материала с искривленными волокнами по ломаной линии. В каждом интерфейсе у пользователя должна быть возможность задать: размеры ограничивающего объема, длину волокон, размер конечных элементов, количество генерируемых волокон, размер прямолинейного участка (только в интерфейсе для создания войлочного материала с искривленными волокнами по ломаной линии).

Программный комплекс должен обеспечивать создание k-файла (входного файла для расчета в пакете программ LS-DYNA) с координатами узлов и стержневыми конечными элементами войлочного материала с прямолинейными волокнами или с искривленными волокнами по ломаной линии.

Программный комплекс должен иметь модульную структуру:

– *Модуль построения модели* предназначен для генерации конечных элементов модели войлочного материала в соответствии с заданными параметрами.

– *Модуль генерации узлов* предназначен для вычисления координат узлов генерируемых конечных элементов. Он выполняет следующие функции: случайная генерация угла отклонения отрезка, вычисление координат следующего узла, проверка принадлежности генерируемого узла ограничивающему объему.

– *Модуль вывода* предназначен для записи вычисленных координат узлов и конечных элементов в выходной k-файл. Данные в модуль вывода поступают из модуля построения модели.

На рис. 1. представлена схема взаимодействия между модулями программного комплекса. 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 построения модели*.

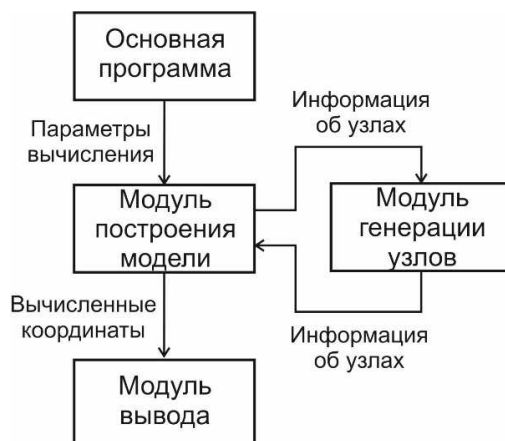


Рис. 1. Схема взаимодействия модулей программного комплекса

Небольшой образец из войлочного материала (Twaron® felt #9) размером 100x100x3,5 мм содержит более 450 000 арамидных волокон диаметром 11 мкм, хаотически распределенных по объему образца. Волокна в данном материале преимущественно прямые длиной 50 мм (среднее значение). Данный материал имеет межслойные связи, которые возникают после пробивания иглами (рис. 2).



Рис. 2. Фотография поверхности войлочного материала (Twaron® felt #9)

Волокна войлочного материала (Twaron® felt #9) созданы с помощью разработанного в данной работе программного комплекса. Межслойные связи в модели учтены следующим образом: созданы стержневые конечные элементы, расположенные на ребрах параллелепипедов, которые не соединены между собой. Размеры параллелепипедов составляют в плоскости 2 × 2 мм и 3,5 мм по толщине образца. Размеры и диаметр ребер приняты, исходя из количества отверстий, оставленных после пробивания иглами и количества волокон в отверстиях в поперечном направлении. Поперечное сечение волокон в модели увеличено в 7 раз по сравнению с реальным размером, чтобы снизить размер-

ность задачи. Материал волокон упругий вплоть до разрушения. Предел прочности на растяжение равен 2,53 ГПа (определено экспериментально), коэффициент сухого трения между волокнами равен 0,4 [9]. Модуль упругости равен 90 ГПа, коэффициент Пуассона 0,2, плотность 1440 кг/м³ [10]. Образец в модели не закреплен. Ударник в модели имеет сферическую форму диаметром 6,35 мм массой 1,05 г, материал – сталь. Скорость ударника варьировалась от 300 до 600 м/с. Моделирование ударного нагружения баллистического войлока проведено с использованием явной схемы интегрирования.

2. Реализация

Для создания модели войлочного материала пользователю необходимо ввести в пользовательский интерфейс разработанного программного комплекса размеры ограничивающего объема по осям x , y и z , длину волокон, размер прямолинейного участка, размер конечных элементов и количество генерируемых волокон. После этого программный комплекс создаст модель на основе введенных параметров. Интерфейс для создания войлочного материала с прямолинейными волокнами включает в себя те же поля ввода, что и интерфейс для создания войлочного материала с искривленными волокнами по ломаной линии за исключением поля для ввода размера прямолинейного участка.

Алгоритм работы программного комплекса включает в себя следующие шаги:

1. Считывание входных параметров, описывающих модель.
2. Генерация заданного количества волокон:
 - 2.1) генерация координат начального узла для каждого волокна,
 - 2.2) генерация угла отклонения отрезка,
 - 2.3) вычисление координат следующего узла на основе сгенерированного угла (для войлочного материала с искривленными волокнами (ломаная линия) каждый раз генерируется новый угол, для войлочного материала с прямолинейными волокнами угол остается прежним) и проверка принадлежности узла ограничивающему объему.

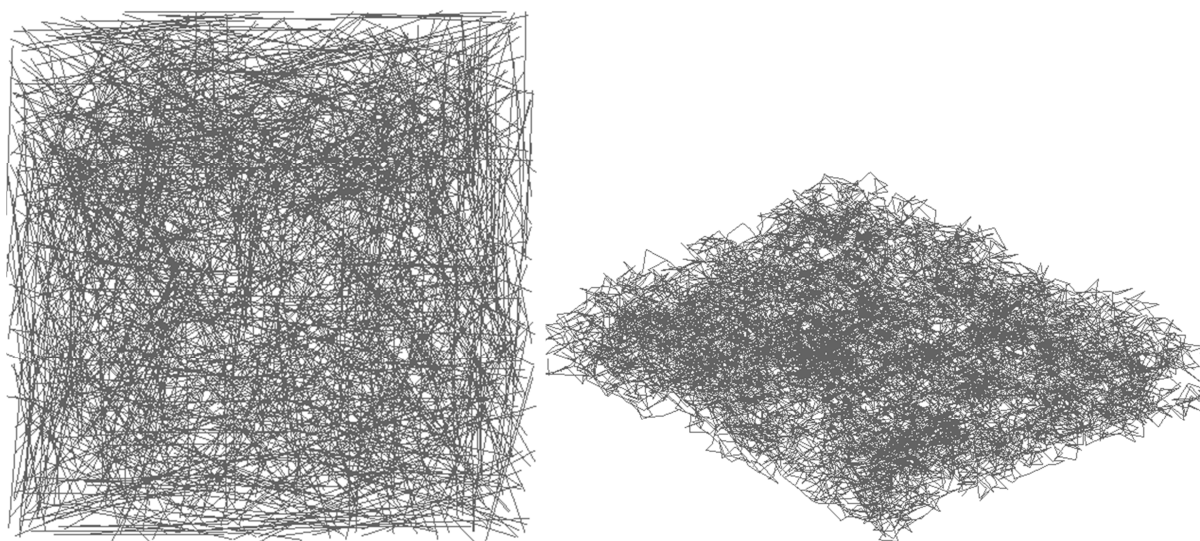
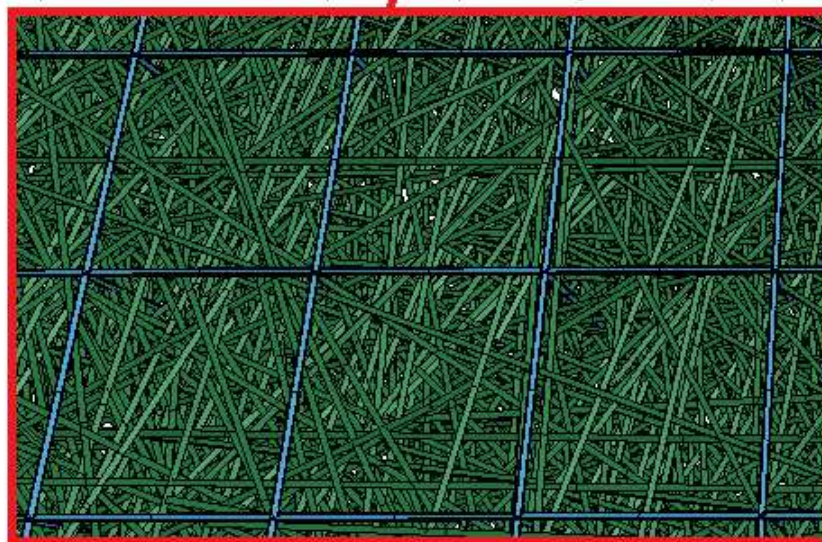
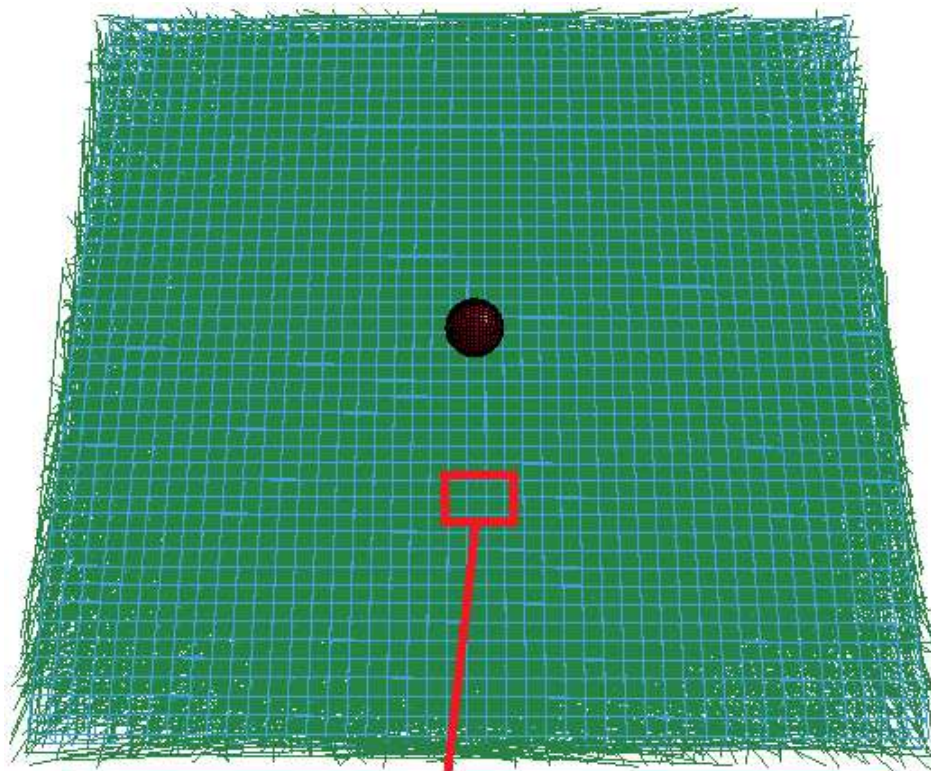


Рис. 3. Визуализация модели войлочного материала с прямолинейными волокнами (слева) и с волокнами, искривленными по ломаной линии (справа)

На рис. 3 представлено построение модели войлочного материала с прямолинейными волокнами размером $0,15 \times 0,15 \times 0,001$ м, длина волокон 0,06 м, размер конечных элементов 0,002 м, из 1500 волокон и с искривленными волокнами по ломаной линии размером $0,05 \times 0,05 \times 0,01$ м, длина волокон 0,05 м, размер прямолинейного участка 0,002 м, размер конечных элементов 0,001 м, из 500 волокон.



Вид сверху



Вид сбоку

Рис. 4. Сетка конечных элементов

Сетка конечных элементов 3D модели войлочного материала (Twaron® felt #9) размером $100 \times 100 \times 3,5$ мм показана на рис. 4.

3. Результаты исследований

Вычисления по определению остаточных скоростей после пробоя баллистического войлока были проведены на суперкомпьютере «Торнадо ЮУрГУ» [11] с пиковой производительностью 473 Тфлопс в пакете программ LS-DYNA. Расчетные данные по остаточным скоростям отлично согласуются с экспериментальными данными, разница не превышает 1 %.

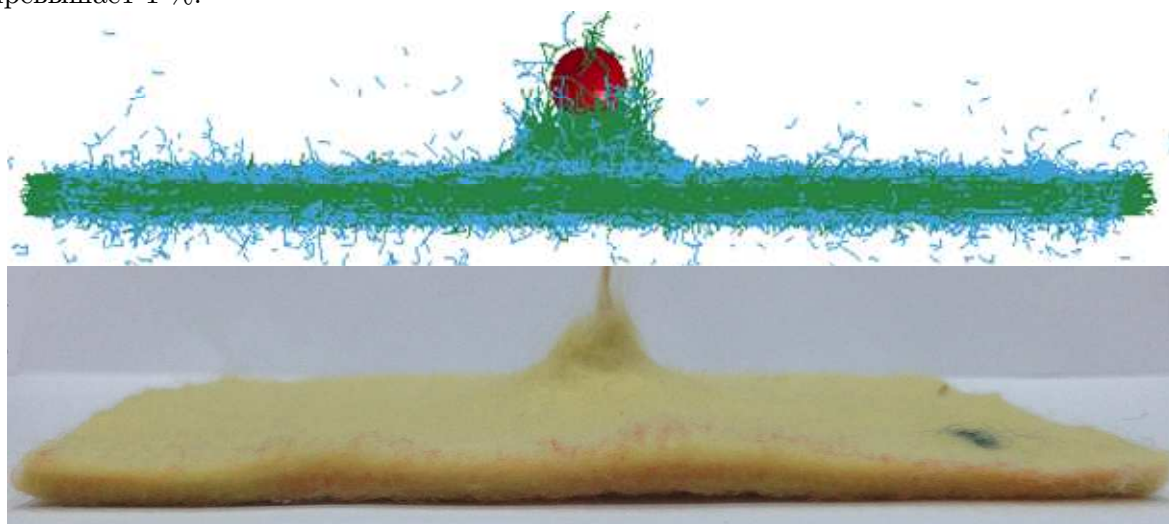


Рис. 5. Картины деформирования и разрушения войлочного материала (1 слой, начальная скорость ударника 497 м/с, сверху – расчет, снизу – эксперимент)

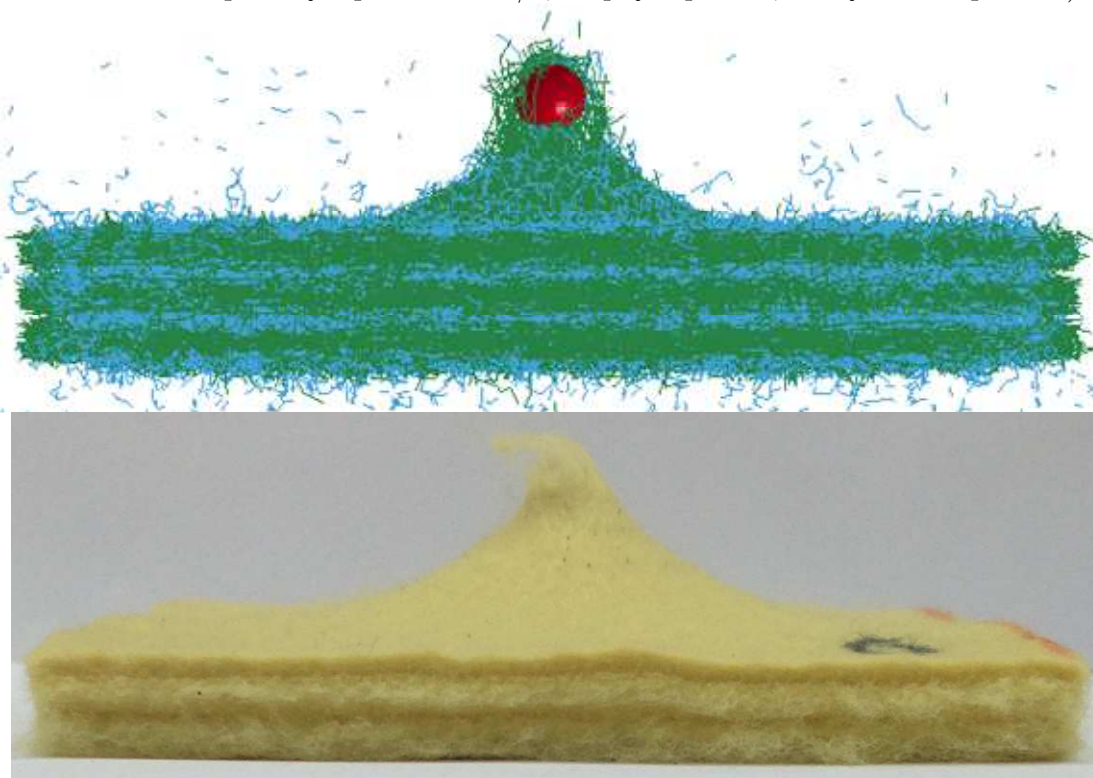


Рис. 6. Картины деформирования и разрушения войлочного материала (3 слоя, начальная скорость ударника 519 м/с, сверху – расчет, снизу – эксперимент)

На рис. 5, 6 приведено сравнение картин деформирования и разрушения баллистического войлока (1 и 3 слоя) при ударном нагружении.

График ускорения для задач ударного нагружения одного и трех слоев войлочного материала представлен на рис. 7. Данная задача была распараллелена до 48 ядер, это связано с имеющейся лицензией на пакет программ LS-DYNA. Время решения задач на одном ядре составляет 15 245 с и 201 719 с для одного и трех слоев войлочного материала соответственно.

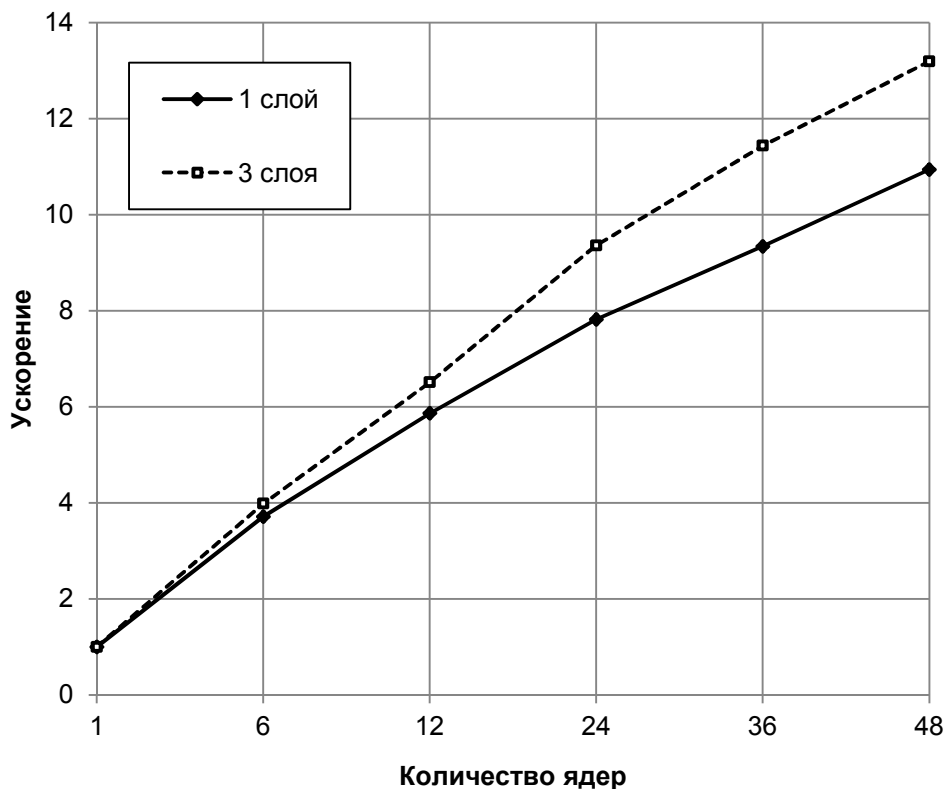


Рис. 7. Ускорение решения задачи ударного нагружения

Заключение

Разработан программный комплекс для создания компьютерных моделей войлочных материалов с прямолинейными волокнами, а также с искривленными волокнами по ломаной линии. В ходе работы были решены следующие задачи: спроектирован и реализован программный комплекс для создания компьютерных моделей войлочных материалов, проведено тестирование программного комплекса с различными параметрами. Программный комплекс позволяет создавать модели войлочных материалов с прямолинейными волокнами и с искривленными волокнами по ломаной линии.

Разработаны малопараметрические численные суперкомпьютерные (детализированные) модели баллистического войлока для проведения расчетных исследований по определению скоростей после пробоя. Выполнена реализация моделей баллистического войлока с проведением расчетов по определению остаточных скоростей после пробоя на суперкомпьютере. Проведено сопоставление экспериментальных и расчетных данных полученных при баллистическом ударе по войлоку. Получено, что экспериментальные и расчетные данные по остаточным скоростям после пробоя отлично согласуются между собой. Расчетные картины пробоя войлочных образцов близки к экспериментальным.

Получены графики ускорения для задач ударного нагружения одного и трех слоев войлочного материала. Полученные модели позволяют с достаточной точностью прогнозировать остаточную скорость ударника после пробоя и характер деформирования и разрушения исследуемых материалов.

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

Литература

1. Долганина Н.Ю., Сапожников С.Б. Исследование влияния типа переплетения нитей на прочность тканевых преград при локальном ударе // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2013. Т. 13, № 2. С. 95–104.
2. Chocron S., Pintor A., Galvez F., Rosello C., Cendon D., Sanchez-Galvez V. Lightweight Polyethylene Non-Woven Felts for Ballistic Impact Applications: Material Characterization // Composites. 2008. Part B 39. P. 1240–1246.
3. Ridruejo A., González C., Llorca J. Failure Locus of Polypropylene Nonwoven Fabrics under in-plane Biaxial Deformation // Comptes Rendus Mecanique. 2012. Vol. 340. P. 307–319.
4. Ridruejo A., González C., Llorca J. A Constitutive Model for the in-plane Mechanical Behavior of Nonwoven Fabrics // International Journal of Solids and Structures. 2012. Vol. 49. P. 2215–2229.
5. Demirci E., Acar M., Pourdeyhimi B., Silberschmidt V.V. Finite Element Modelling of Thermally Bonded Bicomponent Fibre Nonwovens: Tensile Behaviour // Computational Materials Science. 2011. Vol. 50. P. 1286–1291.
6. Farukh F., Demirci E., Sabuncuoglu B., Acar M., Pourdeyhimi B., Silberschmidt V.V. Numerical Analysis of Progressive Damage in Nonwoven Fibrous Networks under Tension // International Journal of Solids and Structures. 2014. Vol. 51. P. 1670–1685.
7. Sabuncuoglu B., Acar M., Silberschmidt V.V. Finite Element Modelling of Fibrous Networks: Analysis of Strain Distribution in Fibres under Tensile Load // Computational Materials Science. 2013. Vol. 79. P. 143–158.
8. Ridruejo A., Gonzalez C., Llorca J. Damage Micromechanisms and Notch Sensitivity of Glass-Fiber Non-Woven Felts: An Experimental and Numerical Study // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2010. Vol. 58. P. 1628–1645.
9. Martinez M.A., Navarro C., Cortes R., Rodriguez J., Sanchez-Galvez V. Friction and wear behaviour of Kevlar fabrics // Journal of materials science. 1993. Vol. 28. P. 1305–1311.
10. Ballistics material handbook. Teijin Aramid. URL: <http://www.teijinaramid.com/wp-content/uploads/2013/05/Teijin-Aramid-Ballistics-Material-Handbook-English1.pdf> (дата обращения: 15.09.15).
11. Костенецкий П.С., Сафонов А.Ю. Суперкомпьютерный комплекс ЮУрГУ // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2016): труды международной научной конференции (28 марта – 1 апреля 2016 г., г. Архангельск). Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. 2016. С. 561–573.

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

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

Поступила в редакцию 11 декабря 2015 г.

Bulletin of the South Ural State University
Series "Computational Mathematics and Software Engineering"
2016, vol. 5, no. 2, pp. 95–104

DOI: 10.14529/cmse160208

THE DEVELOPMENT OF COMPUTER MODELS OF FELT MATERIALS USED IN ARMOR

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

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

The article is devoted to the development of models of felt materials used in armor by numerical methods. To create a finite element mesh of felt material software in C++ was developed, designed, implemented and tested. The software allows you to create numerical models of felt material with straight fibers or twisted fibers with a broken line. Models of felt materials are created, conducted supercomputer simulations of impact loading felt material in the software LS-DYNA and compared with experimental data. Work is devoted to the development a system to create a computer models of felts, which are used in armor. The system was designed and implemented. System testing was performed. This system allows to create models of felts with the straight fibers or with the curved fibers in a broken line. The resulting models are designed for the supercomputer simulation shock loading of felts in the framework of the LS-DYNA software package.

Keywords: numerical methods, finite element method, modeling, felt, fiber, armor.

FOR CITATION

Dolganina N.Yu., Kibel M.O. The Development of Computer Models of Felt Materials Used in Armor. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2016. vol. 5, no. 2. pp. 95–104. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse160208.

References

1. Dolganina N.Yu., Sapozhnikov S.B. Issledovanie vliyaniya tipa perepleteniya nitey na prochnost' tkanevykh pregrad pri lokal'nom udare [Study of the Influence of Type Weave for Strength of the Textile Armor Panel at the Local Impact] *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Engineering]. 2013. vol. 13, no. 2. pp. 95–104. (in Russian)
2. Chocron S., Pintor A., Galvez F., Rosello C., Cendon D., Sanchez-Galvez V. Lightweight Polyethylene Non-Woven Felts for Ballistic Impact Applications: Material Characterization. *Composites*. 2008. Part B 39. pp. 1240–1246.

3. Ridruejo A., González C., Llorca J. Failure Locus of Polypropylene Nonwoven Fabrics under in-plane Biaxial Deformation. *Comptes Rendus Mecanique*. 2012. vol. 340. pp. 307–319.
4. Ridruejo A., González C., Llorca J. A Constitutive Model for the in-plane Mechanical Behavior of Nonwoven Fabrics. *International Journal of Solids and Structures*. 2012. vol. 49. pp. 2215–2229.
5. Demirci E., Acar M., Pourdeyhimi B., Silberschmidt V.V. Finite Element Modelling of Thermally Bonded Bicomponent Fibre Nonwovens: Tensile Behaviour. *Computational Materials Science*. 2011. vol. 50. pp. 1286–1291.
6. Farukh F., Demirci E., Sabuncuoglu B., Acar M., Pourdeyhimi B., Silberschmidt V.V. Numerical Analysis of Progressive Damage in Nonwoven Fibrous Networks under Tension. *International Journal of Solids and Structures*. 2014. vol. 51. pp. 1670–1685.
7. Sabuncuoglu B., Acar M., Silberschmidt V.V. Finite Element Modelling of Fibrous Networks: Analysis of Strain Distribution in Fibres under Tensile Load. *Computational Materials Science*. 2013. vol. 79. pp. 143–158.
8. Ridruejo A., Gonzalez C., Llorca J. Damage Micromechanisms and Notch Sensitivity of Glass-Fiber Non-Woven Felts: An Experimental and Numerical Study. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2010. vol. 58. pp. 1628–1645.
9. Martinez M.A., Navarro C., Cortes R., Rodriguez J., Sanchez-Galvez V. Friction and wear behaviour of Kevlar fabrics. *Journal of materials science*. 1993. vol. 28. pp. 1305–1311.
10. Ballistics material handbook. Teijin Aramid. URL: <http://www.teijinaramid.com/wp-content/uploads/2013/05/Teijin-Aramid-Ballistics-Material-Handbook-English1.pdf> [accessed: 15.09.15].
11. Kostenetskiy P.S., Safonov A.Y. Superkomp'yuternyy kompleks Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo universiteta [SUSU Supercomputer Resources]. *Parallel'nye vychislitel'nye tekhnologii (PaVT'2016): trudy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Proceedings of the 10th Annual International Scientific Conference on Parallel Computing Technologies (PCT 2016)]. Arkhangelsk, Russia, March 29-31, 2016. CEUR Workshop Proceedings. 2016. vol. 1576. pp. 561-573.

Received December 11, 2015.