СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ ИСКРИВЛЕННЫХ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ

Н.Ю. Долганина

Введение

Согласно классификации, приведенной в ГОСТ Р 50744-95 [1], бронежилеты делятся на легкие (1-го и классов), представляющие собой слоистые тканевые бронепанели различной толщины, и 2-го комбинированные (от 3 до 6а класса), в которых слоистая тканевая бронепанель усилена с лицевой стороны жесткими элементами из металла или керамики. Все бронежилеты состоят из грудной и спинной секций (бронепанелей). Бронепанель тканевого бронежилета может иметь в своем составе десятки слоев баллистических тканей из арамидных нитей Кевлар (США) или Русар (Россия). Типичный размер бронепанели 30х30 см. Кроме требований по защите тела, которые предъявляются к бронежилетам, они должны быть комфортными при эксплуатации, не стеснять движений, принимать форму грудной клетки. В комбинированных бронежилетах жесткие элементы делают искривленными, а легкие (тканевые) бронежилеты из-за своей податливости сами принимают нужную форму. При сертификационных испытаниях, бронежилеты располагают на пластилиновом основании [1, 2]. Согласно американскому стандарту NIJ Standard-0101.06 [2] в ряде случаев пластилиновое основание делают с криволинейной поверхностью (повторяет форму человеческого тела, радиус кривизны в среднем 25 см). Так как объектом исследования в работе являются искривленные баллистические ткани, то среди уровней угроз в 1-ом и 2-м классах (тканевые бронежилеты) самым опасным средством поражения является пистолет ТТ с пулями массой 5,5 г, калибром 7,62, стальным сердечником и максимальной скоростью 440 м/с.

При ударе пулей в баллистических тканях возникают сложные физические явления: динамическое деформирование с распространением ударных волн, большие прогибы, образование и исчезновение множественных фрикционных контактов, вытягивание и разрушение нитей и др. Все это существенно затрудняет теоретический анализ проблемы локального ударного взаимодействия баллистических тканей с индентором. Поэтому в настоящее время при разработке новых конструкций бронежилетов, отличающихся меньшей массой и стоимостью, высокой надежностью, опираются, в основном, на натурный многофакторный эксперимент, что приводит к удлинению сроков проектирования и увеличению стоимости этапа доводки (и изделия в целом), не позволяет выявить влияние различных факторов на прочность и уровень травмирования.

Моделирование тканевых структур прошло несколько стадий развития. Фундаментальной работой в области исследования прочности при интенсивных кратковременных нагрузках является работа Х.А. Рахматулина 1961 года, где рассмотрен удар по прямой гибкой деформируемой незакрепленной нити бесконечной длины (аналитическое решение) [3]. Интенсивное развитие моделирования тканевых структур началось с развитием вычислительной техники и соответствующих прикладных программ. Вначале ткань заменяли ортотропной пластиной [4], затем сетками из ортотропных нитей со связанными узлами [5]. В последнее десятилетие развиваются суперкомпьютерные модели, где моделируется каждая нить, т.к. это позволяет получить более точные и адекватные результаты [6, 7]. Они ориентированы в основном на пакет конечно-элементного анализа LS-DYNA.

В ряде работ используют оболочечную дискретизацию отдельных нитей [8]. Линзообразное поперечное сечение отдельной нити моделируют несколькими смежными оболочечными элементами с различными толщинами. Однако в таких моделях оболочечные элементы с различными толщинами имеют разрыв в соответствующих граничных условиях и затруднена формулировка условий контакта нитей. Нити в ткани разбивают также и на объемные конечные элементы [9]. Преимущество дискретизации объемными элементами перед оболочечными с разными толщинами – это сглаживание плоскости поперечного сечения. Однако такие модели тканей при реальных размерах бронежилетов порядка 30х30 см имеют чрезвычайно большую размерность, что не позволяет рассчитывать слоистые тканевые бронепанели с немногими слоями ткани даже с использованием современных суперкомпьютеров.

В настоящее время баллистические ткани, которые входят в состав бронежилетов, моделируют с точностью до нити с не искривленной (прямолинейной) срединной поверхностью, это связано со сложностью построения геометрии ткани [10].

Таким образом, задачей исследования было создать суперкомпьютерную модель баллистической ткани с искривленной срединной поверхностью, которая бы позволила рассчитать на суперкомпьютере бронепанели реальных размеров (30х30 см) для замены большего числа натурных экспериментов виртуальными; сравнить результаты расчетов при ударном нагружении баллистических тканей с прямолинейной и криволинейной срединными поверхностями.

В настоящей статье рассматривается моделирование ударного нагружения искривленных баллистических тканей на суперкомпьютере "Торнадо ЮУрГУ". Статья организована следующим образом. В разделе 1 приведена постановка задачи. В разделе 2 описываются методы исследования, и приводится описание

задачи. В разделе 4 обсуждаются результаты проведенных экспериментов на суперкомпьютере. В заключении суммируются основные результаты, полученные в данной работе.

1. Постановка задачи

Проведено суперкомпьютерное моделирование ударного нагружения баллистических тканей с прямолинейной и искривленной срединной поверхностями, а также прямой нити и искривленной.

В расчетной модели баллистической ткани нити имеют относительную свободу перемещения с возможностью вытягивания с учетом сухого трения. Рассматривали нити, которые имеют прямоугольное поперечное сечение и были представлены одним оболочечным элементом по ширине с одной точкой интегрирования по толщине и выполнены из ортотропного материала с малыми поперечно-сдвиговыми свойствами. Нити в расчетной модели не разрушаются. Края ткани не были закреплены. В расчете индентор имел форму цилиндра с полусферическим основанием диаметром 7 мм, массой 5,5 г, с начальной скоростью 440 м/с (имитация пули пистолета TT) и был выполнен из абсолютно жесткого материала.

2. Методы исследования

Элементом ткани является нить и только для нее существует аналитическое решение. В работе X.A. Рахматулина [3] приведено теоретическое решение точечного удара по прямой гибкой деформируемой незакрепленной нити бесконечной длины (скорость удара V_0 – постоянна) (рис. 1а). Для верификации модели нити как элемента ткани задача X.A. Рахматулина была решена методом конечных элементов (LS-DYNA): точечный удар по гибкой деформируемой незакрепленной нити длиной 0,3 м (скорость удара постоянна и равна V_0 =440 м/с) (рис. 1а).

Так как бронежилет располагается на теле человека со средним радиусом кривизны R=25 см, то методом конечных элементов была решена задача точечного удара по искривленной гибкой деформируемой незакрепленной нити длиной 0,3 м (радиус кривизны нити R=0,25 м; скорость удара постоянна и равна $V_0=440$ м/с) (рис. 1б).

Модуль упругости нити в продольном направлении Ex=1,4·10¹¹ Па, коэффициент Пуассона µ_{xy}=0,3; плотность нити р=1440 кг/м³. Ширина нити 500 мкм и толщина 100 мкм. Нить была разбита на оболочечные конечные элементы с одной точкой интегрирования по толщине. Размер конечного элемента равен 500 мкм. Для обеспечения устойчивого решения было принято задать модули упругости материала нити в поперечном и сдвиговом направлениях на два порядка меньше модуля упругости в продольном направлении, коэффициенты Пуассона µ_{zx}, µ_{zy} были вычислены из соотношений теории ортотропной упругости.



Геометрия нитей в ткани была предельно упрощена для того, чтобы снизить размерность задачи при расчете. Криволинейная ось нити была заменена ломаной, с прямолинейными горизонтальными и наклонными участками (рис. 2). Повторяющийся элемент ткани показан на рис. 2, где отмечены номера ключевых точек. Геометрия искривленной ткани была построена с использованием программ SolidWorks и ANSYS. Сетка конечных элементов была построена в программе ANSYS (рис. 3).





Рис. 3. Сетка конечных элементов ткани и индентора

В пакете программ LS-DYNA представлено более сотни моделей материала [11], наиболее интересными для нас были малопараметрические модели, их анализ показал, что для нитей наиболее подходит материал *MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE, позволяющий задать ортотропные свойства нитей. Характеристики нитей для ввода в программу LS-DYNA: толщина нити T=100 мкм, ширина нити D=500 мкм,

модули упругости Ex=1,4·10⁵ МПа и Ey=1,4·10³ МПа, плотность ρ =1440 кг/м³, коэффициент Пуассона μ_{xy} =0,3, модули сдвига Gxy=Gyz=Gzx=1,4·10³ МПа.

В конечно-элементной модели ткани нити имеют относительную свободу перемещения и возможность вытягивания с учетом сухого трения. Контакт объектов моделировали командой *CONTACT_AUTOMATIC_ SURFACE_TO_SURFACE с коэффициентом сухого трения 0,4, характерным для арамидных нитей [12]. Механические свойства нитей и тканей определены экспериментально на универсальной испытательной машине Instron 5882.

Стальной индентор при взаимодействии с тканевой бронепанелью при скоростях до 600 м/с не разрушается и не имеет пластических деформаций, поэтому для сокращения времени расчетов для него был выбран материал *MAT_RIGID (жесткое тело) с плотностью р=7800 кг/м³ и модулем упругости E=2,1 · 10¹¹ Па.

3. Результаты исследований и их анализ

Расчеты динамического нагружения прямой и искривленной нитей, а также баллистических тканей размером 30х30 см с прямолинейной и искривленной срединной поверхностями были проведены на суперкомпьютере "Торнадо ЮУрГУ", оснащенном 480 вычислительными узлами с двумя процессорами Intel Xeon X5680 (6 ядер по 3.33 GHz) и оперативной памятью 15.36 ТВ [13].

При ударе по нити в точке постоянной скоростью первое главное напряжение в нити возрастает до определенной величины и остается постоянным, пока волна Римана не дойдет до конца нити и вернется, разгрузив нить (рис. 4). Сравнение результатов решения методом конечных элементов с решением Х.А. Рахматулина показало, что различие полученных напряжений, времени, за которое волна Римана дойдет до конца нити и вернется, угла наклона нити не превышает 1% и обусловлено конечностью размеров элементов. Решение методом конечных элементов (МКЭ) с высокой степенью точности соответствует решению Х.А. Рахматулина, т.е. метод конечных элементов дает достоверные результаты.

При точечном ударе по искривленной нити получено, что в начальный момент времени напряжения равны напряжениям в прямой нити, а затем напряжения начинают монотонно снижаться (рис. 4).



(точечный удар)

Расчет динамики деформирования баллистических тканей полотняного переплетения размером 30х30 см с искривленной и прямолинейной срединной поверхностями был проведен до времени t=60 мкс, за которое ударная волна Римана успеет пройти от центра ткани до края и вернуться назад. Верификация модели ткани с прямолинейной срединной поверхностью была проведена ранее в работах [6, 7], проводилось сравнение с реальным экспериментом.

Для примера на рис. 5, 6 приведен характер деформирования баллистической ткани полотняного переплетения размером 30х30 см с искривленной срединной поверхностью в момент времени t=30 мкс.

Для оценки прочности нитей при ударе по баллистическим тканям результаты расчетов были обработаны и получены зависимости первых главных напряжений от времени (рис. 7).





Рис. 5. Характер деформирования ткани с искривленной срединной поверхностью (вид сбоку)

Рис. 6. Характер деформирования ткани с искривленной срединной поверхностью (вид сверху)



Рис. 7. Зависимости первых главных напряжений в нитях от времени

Анализ полученных данных показал, что:

1) в процессе нагружения в нитях текстильных материалов наблюдаются осцилляции напряжений, вызванных наличием узлов переплетений, в которых происходит распрямление нитей и возникает трение;

2) в уточных нитях первые главные напряжения значительно выше, чем в нитях основы. Это происходит из-за того, что нити утка преобладают с лицевой стороны ткани, а основные нити – с изнаночной, поэтому при ударе индентором, вначале нагружаются уточные нити, которые берут на себя значительно больше энергии;

3) напряжения в уточных нитях баллистических тканей растут со временем и оказываются больше среднего предела прочности (3 ГПа) через 21 мкс после начала контакта, в первые 24 мкс напряжения в уточных нитях тканей с прямолинейной срединной поверхностью и искривленной одинаковы, а дальше на стадии вытягивания нитей из тканей напряжения в нитях ткани с прямолинейной срединной поверхностью становятся выше;

4) напряжения в нитях основы баллистических тканей не превышают среднего предела прочности (3 ГПа), в первые 5 мкс напряжения в нитях основы тканей с прямолинейной срединонй поверхностью и искривленной одинаковы, а дальше в нитях ткани с криволинейной срединной поверхностью становятся выше, а при 57 мкс становятся ниже.

График ускорения для задачи ударного нагружения искривленной баллистической ткани, решенной на суперкомпьютере "Торнадо ЮУрГУ" представлен на рис. 8. Данная задача была распараллелена до 60 ядер, это связано с ограничениями по лицензиям на пакет программ LS-DYNA.

4. Заключение

При точечном ударе по прямой нити получено, что первое главное напряжение в нити возрастает до определенной величины и остается постоянным, пока волна Римана не дойдет до конца нити и вернется, разгрузив нить, а в искривленной нити в начальный момент времени напряжения равны напряжениям в прямой нити, а затем напряжения начинают монотонно снижаться.

Получено решение задачи динамического деформирования баллистических тканей с искривленной (повторяет форму грудной клетки человека, радиус кривизны в среднем 25 см) и прямолинейной срединными поверхностями полотняного переплетения размером 30х30 см. Индентор имел скорость 440 м/с. При исследовании ударного нагружения тканей без учета разрушения нитей получено, что темп роста первых

главных напряжений в нитях основы и утка разный из-за того, что нити утка расположены с лицевой стороны в них первые главные напряжения получаются выше, чем в нитях основы.



Рис. 8. Ускорение

В первоначальный момент удара первые главные напряжения в баллистических тканях с прямолинейной и искривленной срединной поверхностями одинаковы, затем первые главные напряжения в нитях утка у тканей с криволинейной срединной поверхностью ниже, а в нитях основы выше.

Получено, что свободные нити и нити, входящие в состав баллистических тканей, при ударном нагружении работают по разному: в свободных нитях напряжения, достигнув определенной величины, не возрастают, а в переплетенных нитях в тканях первые главные напряжения продолжают расти, это связано с тем, что нити начинают взаимодействовать друг с другом, контактировать, вытягиваться.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-08-31184 мол_а.

ЛИТЕРАТУРА:

- 1. ГОСТ Р 50744–95. Бронеодежда. Классификация и общие технические требования. Прин. Постановлением Госстандарта России от 09.09.98 № 345. Введ. с изм. № 1 (01.01.1999). М., 1995.
- 2. National Institute of Technology Standard, NIJ Standard 0101.06 Ballistic Resistance of Body Armor, July 2008.
- 3. Рахматуллин Х.А., Демьянов Ю.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках М.: ГИФМЛ, 1961.
- 4. Lim C.T., Shim V.P.W., Ng Y.H. Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor // International Journal of Impact Engineering. 2003. Vol. 28, No. 1. P. 13-31.
- 5. Tan V.B.C., Shim V.P.W., Tay T.E. Experimental and numerical study of the response of flexible laminates to impact loading // International Journal of Solids and Structures. 2003. Vol. 40, No. 23. P. 6245-6266.
- 6. Долганина Н.Ю. Исследование ударного взаимодействия индентора с тканевыми бронепластинами, расположенными на пластилиновом основании // Вестник ЮУрГУ. Серия "Вычислительная математика и информатика". 2012. № 47(306). Вып. 2. С. 37-45.
- 7. Долганина Н.Ю., Сапожников С.Б. Проектирование новых конструкций тканевых бронепанелей с использованием суперкомпьютерных вычислений // Вестник ЮУрГУ. Серия "Математическое моделирование и программирование". 2011. № 37(254). Вып. 10. С. 71-81.
- Blankenhorn G., Schweizerhof K., Finckh H. Improved Numerical Investigations of a Projectile Impact on a Textile Structure // 4th European LS-DYNA Users Conference: Proceedings of the European Users Conference (22-23 May 2003, Ulm). 2003. P. G-I-07 – G-I-14.
- 9. Talebi H., Wong S.V., Hamouda A.M.S. Finite element evaluation of projectile nose angle effects in ballistic perforation of high strength fabric // Composite Structures. 2009. Vol. 87, No. 4. P. 314-320.
- 10. Долганина Н.Ю., Сапожников С.Б., Маричева А.А. Моделирование ударных процессов в тканевых бронежилетах и теле человека на вычислительном кластере "СКИФ Урал" // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии. 2010. Т. 11, № 1. С. 117-126.
- 11. LS-DYNA Keyword user's manual. v.970. LSTC, 2003. 1564p.
- 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, No. 5. P. 1305-1311.
- 13. Суперкомпьютер "Торнадо ЮУрГУ": [http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/tornado/].