

На правах рукописи



Долганина Наталья Юрьевна

**ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ СЛОИСТЫХ ТКАНЕВЫХ
ПЛАСТИН ПРИ ЛОКАЛЬНОМ УДАРЕ**

Специальность 01.02.06 – динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2010

Работа выполнена на кафедре «Прикладная механика, динамика и прочность машин» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор Сапожников С.Б.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Аптуков В.Н.;

кандидат физико-математических наук, доцент Моссаковский П.А.

Ведущая организация –

ГОУ ВПО «Пермский государственный технический университет» (г. Пермь).

Защита состоится «22» декабря 2010 г. в 15:00 часов, на заседании диссертационного совета Д212.298.02 Южно-Уральского государственного университета: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, Ученый совет. Тел. (351) 267-91-23.

Автореферат разослан «16» ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, профессор



Чернявский А.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Многослойная тканевая пластина при динамическом локальном нагружении как расчетная схема может соответствовать широкому спектру объектов – от корпусных элементов транспортных конструкций до средств индивидуального бронирования (СИБ или бронежилетов) различных уровней защиты. В ГОСТ Р 50744-95 представлено 10 уровней угрозы, которым соответствуют различные по конструкции СИБ: легкие (1 и 2 класса), представляющие собой слоистые тканевые пластины различной толщины, и комбинированные (от 3 до 6а класса), в которых слоистая тканевая пластина усилена с лицевой стороны жесткими элементами из металла или керамики. Современные тенденции проектирования комбинированных СИБ высоких уровней защиты требуют, чтобы металл или керамика пробивались, притупляя или разрушая сердечники пуль, снижали их скорость до уровня, соответствующего надежной работе тыльной тканевой пластины. Таким образом, тканевые пластины, как важный элемент конструкции, должны обеспечить одинаково допустимое травмирование тела человека в СИБ любых уровней защиты, которое при стандартных испытаниях оценивают по деформации тканевой пластины – глубине следа в регистрирующей среде (техническом пластилине с определенными свойствами).

В легких классах СИБ грудная и спинная пластины содержат несколько десятков слоев высокопрочных тканей различного переплетения (саржа, сатин, полотно и др.). Нагружение тканевых пластин происходит инденторами (пулями, осколками), отличающимися формой (острый или притупленный носок), калибром, длиной, скоростью соударения, углом между вектором скорости и нормалью к поверхности, координатами точки удара и др. Все эти факторы могут существенно влиять на прочность тканевых пластин и уровень травмирования тела человека.

При локальном ударе в тканевой пластине 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 тканевой пластины с индентором. Поэтому в настоящее время при разработке новых конструкций многослойных тканевых пластин, отличающихся меньшей массой, 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.

Однако интенсивное развитие вычислительной техники, появление суперкомпьютеров в последние годы, делает возможным решение все более сложных задач динамики деформирования и разрушения многослойных тканевых пластин на основе уточненных расчетных моделей, эффективных численных методов и современных алгоритмов параллельных вычислений. Все это определяет **актуальность** данной работы, позволяя сместить центр тяжести исследований в область математического моделирования многослойных тканевых пластин, ускорения процесса анализа и отбора вариантов, оставив за экспериментом лишь этап финальной оценки полученного перспективного проекта.

Цель исследования заключается в разработке расчетных моделей многослойной тканевой пластины для численной оценки ее деформируемости и прочности при динамическом локальном нагружении с использованием суперкомпьютерных вычислений.

Научная новизна работы.

1. Впервые разработаны малопараметрические модели плоских тканевых структур, отличающиеся учетом характера переплетения нитей с возможностью образования фрикционных контактов и больших относительных смещений нитей.

2. Показана возможность использования модели ортотропной пластины с одной точкой интегрирования по толщине, с малыми поперечно-сдвиговыми свойствами для замены арамидной нити в составе плоской ткани и ее разрушения по критерию наибольшего растягивающего напряжения.

3. Показана возможность использования модели упругопластического тела с пределом текучести, зависящим от скорости нагружения для замены технического пластилина (регистрирующей среды, имитирующей реакцию тела человека на локальный удар).

4. Показана возможность замены реальной многослойной тканевой пластины эквивалентной пластиной с меньшим числом слоев при оценке ее прочности при локальном ударе, и предложены новые способы декомпозиции задачи при ее решении на многопроцессорных системах.

Достоверность результатов и выводов в работе обосновывается сопоставлением численных результатов с известными теоретическими и с экспериментальными данными, применением апробированных численных методов и пакетов прикладных программ.

Практическая значимость работы. Разработанные в диссертации модели и методы расчета деформируемости и прочности при локальном ударе тканевой пластины позволяют провести детальный анализ для выявления наиболее важных факторов, влияющих на эффективность защиты; оперативно оценить величину баллистического предела тканевой пластины, и дать оценку уровня травмирования тела человека. Результаты исследований внедрены в практику работы ЗАО «ФОРТ Технология» (г. Москва), о чем имеется соответствующий акт.

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены и обсуждены на международных и всероссийских конференциях: 1-ой всероссийской конференции пользователей программы LS-DYNA (Снежинск, 2005), Finite element modeling of textiles and textile composites (St.-Petersburg, 2007), Параллельные вычислительные технологии (Уфа, 2010), Инновационные направления в расчетах прочности с использованием суперкомпьютеров и грид-технологий (Кыштым, 2010) и научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (Челябинск, 2009 – 2010).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10–07–96007-р_УРАЛ_a).

Работа заняла 2-е место в конкурсе «Невозможное стало возможным: реальные приложения для НРС» 2010 г. Организаторы конкурса: корпорация Intel и госкорпорация РОСНАНО.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 8 работах (2 из списка ВАК).

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 175 источников, приложений; изложена на 128 страницах машинописного текста; содержит 49 рисунков, 16 таблиц. В приложения включены вспомогательные материалы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен анализ литературных источников, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям деформирования и разрушения слоистых тканевых пластин при локальном динамическом нагружении.

Аналитический фундамент механики одиночной нити при локальном поперечном ударе заложен известной монографией Х.А. Рахматулина и Ю.А. Демьянова [1]. Полученные в этой работе зависимости используются для

¹ Рахматулин, Х.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках / Х.А. Рахматулин, Ю.А. Демьянов. – М.: ГИФМЛ, 1961. – 399 с.

верификации численных алгоритмов в ряде опубликованных работ. Однако ткань состоит из множества переплетенных нитей, механика деформирования и разрушения которых при локальном ударе существенно отлична от механики деформирования одиночной нити. Методам экспериментального и численного исследования динамического локального нагружения многослойных тканевых и композитных пластин различной структуры посвящены работы В.Н. Аптукова, В.Г. Бовы, В.А. Григоряна, И.В. Клепикова, Д.У. Лиминга, В.М. Маринина, Т.В. Морозовой, В.С. Свирида, Е.Ф. Харченко, В.А. Хромушина, R. Barauskas, F. Baudry, H. Broos, В. Broucke, D.S. Ivanov, S.V. Lomov, K. Schweizerhof, V.V.C. Tan., I. Verpoest, H. Xie.

В работах, посвященных экспериментальному исследованию, изучали свойства реальных многослойных пластин, составленных из одинаковых тканей саржевого (отечественные разработки) или полотняного (зарубежные разработки) переплетений, при этом не рассмотрен вопрос об использовании тканей различного типа переплетения в структуре одной многослойной пластины; не рассмотрено влияние размеров тканевых пластин на прочность и деформируемость.

Чисто аналитических моделей, описывающих процесс динамического взаимодействия индентора с многослойной тканевой пластиной с учетом разрушения нитей, на данный момент не существует и, очевидно, их получение невозможно из-за сложности физических явлений, происходящих в этом процессе.

В первых работах, посвященных численному исследованию взаимодействия слоистых тканевых пластин с инденторами, баллистические ткани заменяли мембраной, затем использовали сетки со связанными узлами. В этих численных моделях невозможно было учесть контактное взаимодействие между нитями, их вытягивание при локальном динамическом нагружении, которое вносит существенный вклад в рассеяние энергии индентора (работы Е.Ф. Харченко с соавт.).

Для исследования поведения конструкций, имеющих тканую структуру, в ряде работ из ткани выделяют повторяющийся элемент, моделируют его с высокой степенью точности, изучают его осредненные («эффективные») свойства при различных видах нагружения, затем полученные свойства используют для расчета таких конструкций, заменяя ткань сплошной анизотропной «эффективной» средой. Такой подход, применительно к расчету взаимодействия слоистых тканевых пластин с индентором, неприемлем, т.к. в этом случае невозможен учет фрикционных контактов и разрыва отдельных нитей.

С развитием вычислительных возможностей ЭВМ в настоящее время можно моделировать ткань с точностью до отдельных нитей, учитывая форму попереч-

ного сечения, искривление нитей с помощью гладких кривых, используя метод конечных элементов (МКЭ) и объемные конечные элементы для расчета напряженно-деформированного состояния при заданных воздействиях. Однако такие модели тканей при реальных размерах СИБ порядка 30x30 см имеют чрезвычайно большую размерность (количество степеней свободы превышает 10^7), что не позволяет рассчитывать тканевые пластины с немногими слоями ткани даже с использованием современных суперкомпьютеров. Более того, необходимы значительные затраты времени на моделирование таких структур. Материал нитей в моделях используется сильно анизотропный, с низкими значениями поперечно-сдвиговых жесткостей, однако даже при малых модулях сдвига невозможно получить проскальзывание нитей с сухим трением по контактам, возможна потеря точности расчетов для сильно анизотропных материалов. В некоторых работах линзообразное поперечное сечение отдельной нити (рис. 1) моделируется несколькими оболочечными элементами с различными толщинами. Оболочечные элементы с различными толщинами имеют разрыв в соответствующих граничных условиях, поэтому затруднена формулировка условий контакта нитей.

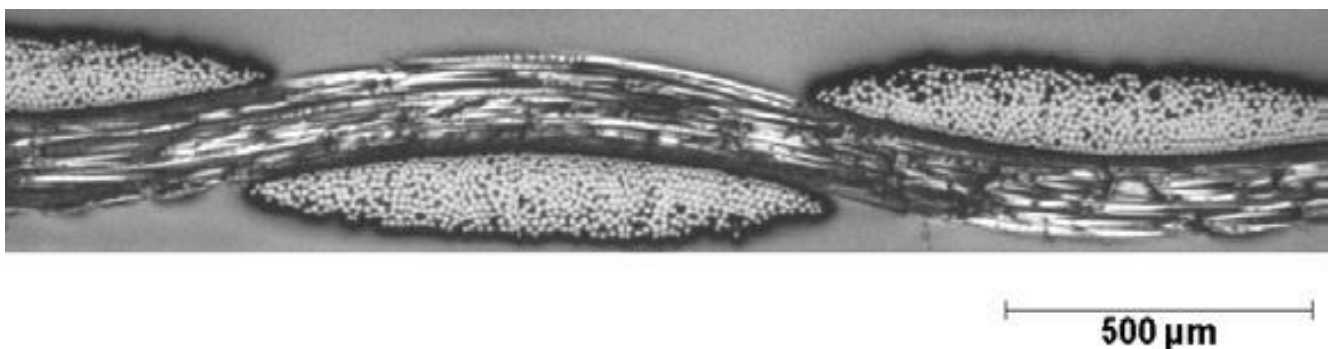


Рис. 1. Продольное сечение ткани полотняного переплетения

Имеются работы, где область вблизи контакта индентора с многослойной тканевой пластиной моделируют весьма детально, а края заменяют сплошной анизотропной средой с конечными элементами большого размера. Такой подход помогает сэкономить машинные ресурсы, дает возможность рассчитывать деформирование пластин больших размеров с несколькими слоями ткани, но полученные результаты не могут считаться надежными. При использовании в одной модели конечных элементов различных размеров и типа, ударный импульс в модели на границе областей изменяет характер распространения, наблюдается дисперсия волнового фронта, меняются условия отражения ударных волн от свободных границ, отсутствует возможность свободного вытягивания нитей, что не со-

ответствует действительности и приводит к получению недостоверных результатов при расчетах для больших временных масштабов.

Реальный бронезилет 2-го класса по ГОСТ Р 50744-95 состоит из нескольких десятков слоев (от 60 до 90 слоев) арамидной ткани. Для ткани полотняного переплетения количество точек контакта нитей утка и основы в таком СИБ составляет более 400 тыс. в одном слое. Для всего бронезилета (например, 65 слоев) количество контактов возрастает до 25 млн. Здесь не учитывали контакты между слоями в процессе ударного взаимодействия. По приближенным оценкам общее число контактов может достичь 40 млн., поэтому для решения таких задач необходимо использовать суперкомпьютеры. Обычные, даже весьма мощные персональные ЭВМ не могут в принципе решать подобные задачи.

Следует также заметить, что прежде чем приступить к изучению работы тканевых пластин необходимо знать механические свойства нитей в тканях. В литературе существуют противоречивые данные по механическим свойствам арамидных нитей. В материалах производителей механические свойства, как правило, завышены. То же можно сказать и по поводу регистрирующей прогибы среды – технического пластилина (имеются лишь качественные рекомендации в соответствующих стандартах).

На основе обзора и анализа литературных источников сформулированы следующие задачи исследования:

1. Определить механические характеристики арамидных нитей многослойных тканевых пластин и регистрирующей среды (технического пластилина).
2. Разработать малопараметрические модели тканевых структур.
3. Провести экспериментальные и расчетные исследования деформируемости и прочности тканевых пластин различной структуры при интенсивном локальном нагружении с применением суперкомпьютерных технологий.
4. Дать оценку эффективности использования разработанных численных моделей и методов декомпозиции тканевых пластин, выработать рекомендации для практики.

Во второй главе приведены методики определения механических характеристик арамидных нитей Русар® номинальной линейной плотности 58,8 текс (58,8 г/км) многослойных тканевых пластин и регистрирующей среды (технического пластилина).

Механические свойства (модуль упругости и предел прочности) арамидных нитей Русар® номинальной линейной плотности 58,8 текс были определены на универсальной испытательной машине Instron 5882. Концы нити наматывали на

неподвижные ролики радиусом $r = 1,5$ см, которые вставляли в захваты испытательной машины. Область контакта нити с роликом склеивали цианоакрилатным клеем, чтобы избежать проскальзывания. Длина свободной нити составляла 5 см, скорость растяжения 100 мм/мин. В результате были построены графики зависимости нагрузки от удлинения нити, определен модуль упругости E и предел прочности σ_B : $E = 140 \pm 5$ ГПа, $\sigma_B = 3,0 \pm 0,16$ ГПа. Электронная микроскопия волокон нитей после разрушения показала, что прочные нити имели округлые «оплавленные» концы, а слабые – расслоенные. Прочность более темных нитей была в среднем на 10% ниже прочности светлых нитей.

Модуль упругости регистрирующей среды (технического пластилина) был определен из испытаний на квазистатическое сжатие цилиндрических образцов (диаметр 20 мм, высота 40 мм) на машине INSTRON 5882 со скоростями нагружения 5, 50, 250 и 500 мм/мин. Обработка начальных участков кривых деформирования дала значение $E = 0,7 \pm 0,1$ МПа. Плотность пластилина $\rho \approx 1800$ кг/м³. Для определения зависимости предела текучести от скорости деформирования был поставлен эксперимент на низкоскоростной удар. Цилиндрический образец из пластилина, соединенный соосно со стальным грузом – цилиндром, бросали с разных высот $H = 0,5 - 2$ м на жесткое неподвижное основание. После удара была измерена остаточная длина образца. Скорость соударения V_0 была определена из равенства потенциальной и кинетической энергий (тепловые эффекты были незначительными) $mgH = mV_0^2/2$, где g – ускорение свободного падения, м/с²; m – масса груза и образца, кг.

Движение цилиндра (груза) считали равнозамедленным. С учетом введенных допущений среднюю скорость деформации образца из пластилина можно определить по зависимости:

$$\dot{\epsilon} \approx \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{1}{t} = \frac{\Delta l}{l} \frac{V_0}{2\Delta l} = \frac{V_0}{2l_0},$$

где l_0 – начальная длина пластилинового цилиндра, м; t – время соударения, с.

Так как в пластилиновом образце при ударе возникают большие пластические деформации, то для определения предела текучести упругим участком диаграммы деформирования пренебрегали (материал – жестко-пластический). Предел текучести можно найти из равенства потенциальной энергии работе внутренних сил: $mgH = \sigma_T \Delta l S$, где σ_T – предел текучести; S – площадь поперечного сечения цилиндра из пластилина.

Так как в пластилиновом образце при ударе возникают большие пластические деформации, то для определения предела текучести упругим участком диаграммы деформирования пренебрегали (материал – жестко-пластический). Предел текучести можно найти из равенства потенциальной энергии работе внутренних сил: $mgH = \sigma_T \Delta l S$, где σ_T – предел текучести; S – площадь поперечного сечения цилиндра из пластилина.

По полученным в эксперименте значениям предела текучести σ_T была построена степенная функция зависимости σ_T (МПа) от скорости деформирования

$\dot{\varepsilon}$ (1/с) с показателем меньше единицы $\sigma_T(\dot{\varepsilon}) \approx 0,94(\dot{\varepsilon})^{0,15}$. Температура пластилина при испытаниях была $21 \pm 1^\circ\text{C}$.

В третьей главе приведена методика моделирования тканевых пластин и технического пластилина при локальном ударе.

В первой части приведена геометрическая сторона моделирования тканевых пластин. В работе рассмотрены ткани полотняного, саржевого и сатинового переплетений (рис. 2).

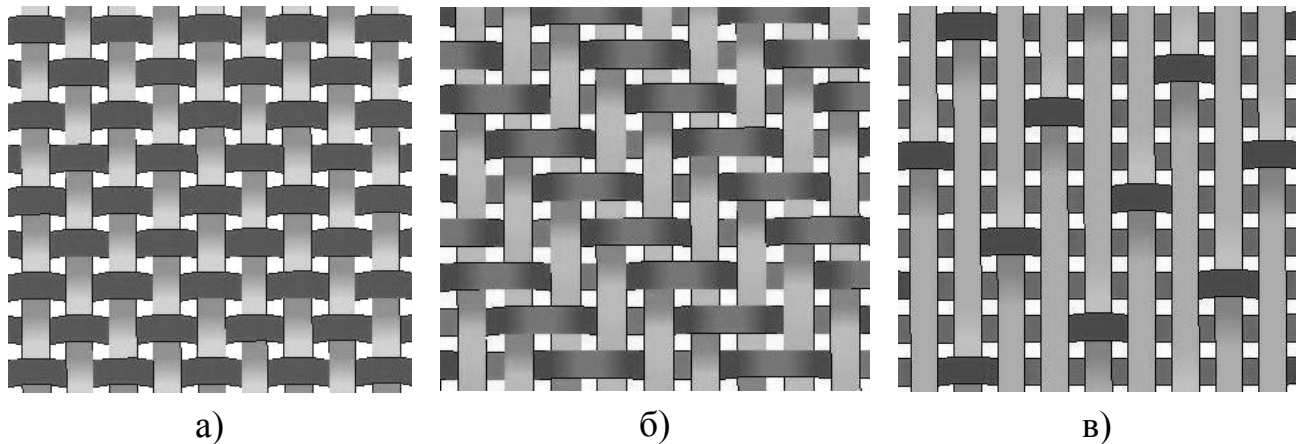


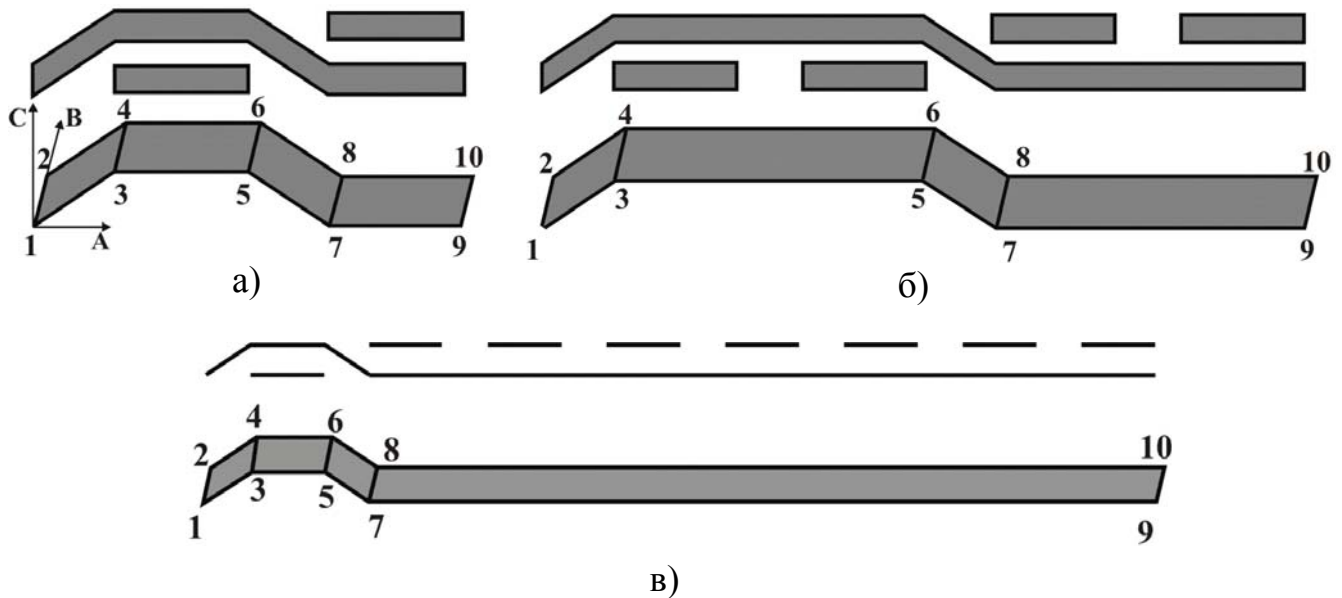
Рис. 2. Схемы переплетения: а) полотняное; б) саржевое; в) сатиновое

Для того чтобы снизить размерность задачи локального динамического нагружения пластины, состоящей из нескольких слоев ткани реальных размеров порядка 30×30 см, геометрия нитей была предельно упрощена. Криволинейная ось нити была заменена ломаной, с прямолинейными горизонтальными участками и наклонными (34° к горизонтальному участку нити). Нити моделировали оболочечными элементами Бельчко-Вонга-Чанга (тип 10). Повторяющиеся элементы тканей показаны на рис. 3, где отмечены номера ключевых точек, координаты которых были введены в программу ANSYS, после чего по ключевым точкам были заданы соответствующие поверхности. Далее набор поверхностей был размножен до получения необходимых размеров модели.

Для решения задачи динамического взаимодействия тканевой пластины и жесткого индентора с помощью пакета программ LS-DYNA геометрия и сетка конечных элементов (*k-файл*) были созданы в пакете ANSYS с последующей коррекцией.

Во второй части рассмотрена физическая сторона моделирования тканевых пластин, технического пластилина и индентора. Реальная арамидная нить Русар[®] номинальной линейной плотности 58,8 текс состоит из 100 – 120 элементарных волокон диаметром 12 – 15 мкм, которые имеют крутку 100 м^{-1} (зарубежные ни-

ти, как правило, некрученые). Для материала нити наиболее близкой является модель ортотропного упругого тела, в которой высокая жесткость имеет место в продольном направлении нити и на несколько порядков меньшая в поперечном и сдвиговом направлениях. Нити моделировали оболочечными элементами с одной точкой интегрирования по толщине.



а) полотняное, б) саржевое, в) сатиновое переплетения.

Рис. 3. Повторяющийся элемент

Принято, что разрушение нити происходит при достижении в ней величины первого главного напряжения $\sigma_I = 3$ ГПа. Эта величина соответствует средней прочности исследованных арамидных нитей.

Из списка материалов, заложенных в пакет программ LS-DYNA, для нитей был выбран *MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE, который позволяет задать ортотропные механические свойства нитей и учесть их разрушение.

В конечно-элементной модели ткани нити имеют относительную свободу перемещения с возможностью вытягивания с учетом сухого трения. Контакт объектов моделировали командой *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE с коэффициентом трения 0,4.

Материал технического пластилина считали упругопластическим с зависимостью предела текучести от скорости деформирования. Из списка материалов, заложенных в библиотеку пакета LS-DYNA, для технического пластилина был выбран *MAT_STRAIN_RATE_DEPENDENT_PLASTICITY, который позволяет учесть зависимость предела текучести от скорости деформирования в табличном виде.

Стальной индентор при взаимодействии с тканевой пластиной 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 $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ и модулем упругости $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$.

В третьей части для выбора размера конечного элемента и верификации модели нити, как элемента ткани, с помощью МКЭ (LS-DYNA) были решены две классические задачи Х.А. Рахматулина: незакрепленная, прямая длинная гибкая нить нагружается а) в точке (рис. 4), б) телом округлой формы с постоянной скоростью, для которых имеются теоретические решения.

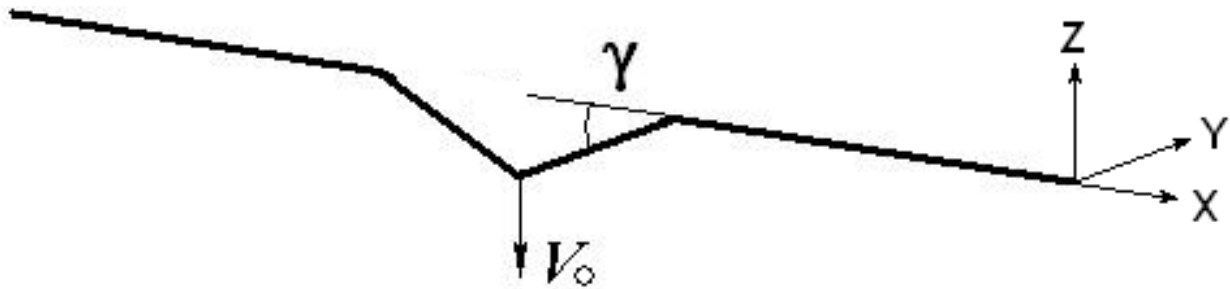


Рис. 4. Задача Х.А. Рахматулина (точечный удар)

Скорость нагружения $V_0 = 445 \text{ м/с}$; модуль упругости нити $E_x = 1,4 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, коэффициент Пуассона равен $\mu_{xy} = 0,3$; плотность нити $\rho = 1440 \text{ кг/м}^3$. Нить длиной 0,3 м шириной 500 мкм и толщиной 100 мкм 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 три порядка меньше модуля упругости в продольном направлении, коэффициенты Пуассона μ_{zx}, μ_{zy} были вычислены из соотношений теории ортотропной упругости.

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. Сравнение результатов решения МКЭ с решением Х.А. Рахматулина показало, что различие полученных напряжений σ , времени, за которое волна Римана дойдет до конца нити и вернется t , угла наклона γ (рис.4) не превышает 1% и обусловлено конечностью размеров элементов.

При ударе по нити цилиндром диаметром $d = 7 \text{ мм}$, массой $m = 1 \text{ кг}$ (на три порядка больше массы нити) в процессе первоначального контакта ($t < 5 \text{ мкс}$) напряжения в нити под цилиндром резко возрастали, превысив на 25% напряжения при точечном нагружении нити, затем напряжения снижались и становились рав-

ными напряжениям при точечном нагружении нити. Рост напряжений был связан с явлением сверхзвукового удара, что подтверждается теоретическим анализом Х.А. Рахматулина.

Был рассмотрен также численный пример точечного удара с постоянной скоростью по искривленной нити с выпуклой стороны (радиус кривизны нити $r = 25$ см). Получено, что в начальный момент времени напряжения равны напряжениям в прямой нити, а затем напряжения начинают монотонно снижаться.

В четвертой главе приведены экспериментальные и расчетные исследования динамического взаимодействия тканевых пластин различных конструкций с инденторами. Расчеты проводились на персональном компьютере и высокопроизводительном кластере «СКИФ Урал».

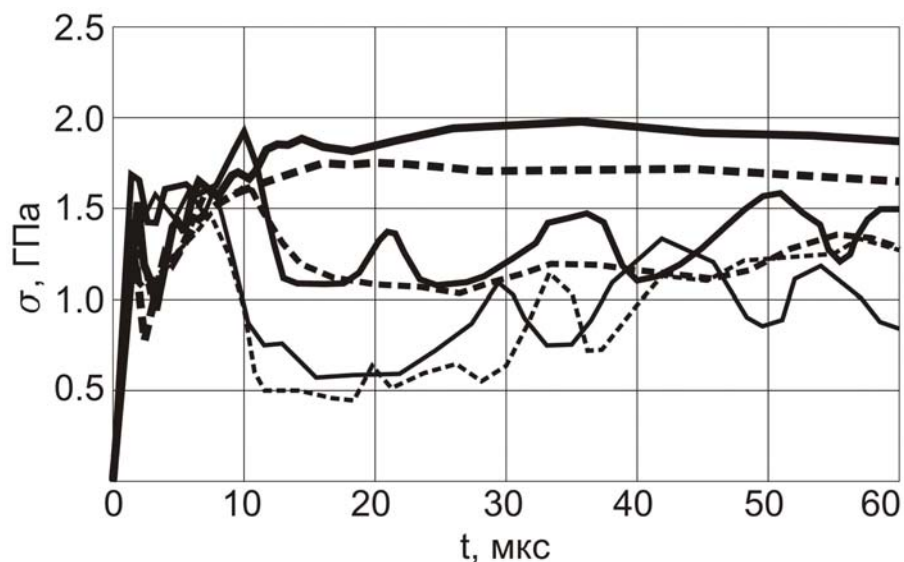
В первой части рассмотрено динамическое взаимодействие индентора с одним слоем ткани различных размеров (5x5, 10x10, 20x20, 30x30 см) и типов переплетения нитей (полотняное, саржевое, сатиновое). Индентор массой 5,5 г диаметром 7 мм имел форму цилиндра с полусферическим основанием, начальная скорость равна 445 м/с (имитация пули пистолета ТТ). Было принято, что нити не разрушаются, удар проводили в центр ткани под прямым углом к поверхности ткани. Края ткани не были закреплены. Расчет динамики деформирования ткани был проведен до времени $t = 60$ мкс, за которое волна Римана дойдет от центра ткани до края и вернется назад.

Получено, что наименьшие напряжения возникают в тканях сатинового переплетения, а также, что напряжения в нитях тканей размером 5x5 см любого типа переплетения не превышают величину предела прочности (рис. 5).

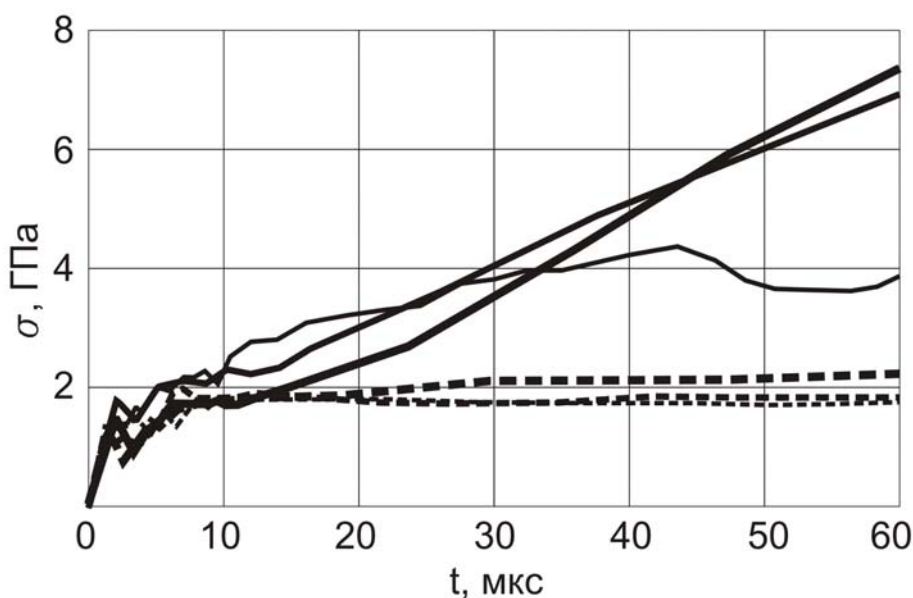
Во второй части было рассмотрено динамическое взаимодействие одного слоя ткани размером 30x30 см сатинового переплетения с индентором, имитирующим пулю пистолета ТТ и ударяющим в центр ткани под углами 0 – 60 градусов к нормали поверхности ткани (нити не разрушаются), а также при ударе в удаленную от центра зону (51 мм от краев) под прямым углом к поверхности ткани.

Были получены зависимости первых главных напряжений во времени от параметров удара. Показано, что наиболее опасным случаем является удар в центр под углом 30°. Это косвенно подтверждается присутствием в стандарте США (NIJ 0101-06 баллистическая стойкость бронежилетов) такого вида испытаний.

В третьей части было рассмотрено динамическое взаимодействие индентора с одним слоем ткани при условиях, описанных в первой части четвертой главы, за исключением того, что нити могли разрушаться.



Размер ткани 5x5 см



Размер ткани 30x30 см

- | | |
|----------------------------------|--|
| — Полотняное переплетение, уток; | — — — — — полотняное переплетение, основа; |
| — саржевое переплетение, уток; | — · — · — саржевое переплетение, основа; |
| — сатиновое переплетение, уток; | — · — · — сатиновое переплетение, основа. |

Рис. 5. Зависимости первых главных напряжений в нитях от времени

В расчетах рассматривали потерю скорости индентора при пробое одного слоя ткани. Критерием эффективности тканевой пластины, очевидно, является отношение изменения скорости индентора ΔV к массе пластины M : $k = \Delta V/M$. Получено, что ткани любого переплетения размером 5x5 см не пробиваются (рис. 6 а, б). Ткани размером больше, чем 5x5 см саржевого и полотняного переплетений пробиваются (рис. 6 в, г), причем потеря скорости в случае саржевого переплетения выше, чем в случае полотняного на 1...22% в зависимости от размера ткани.

В четвертой части было рассмотрено расчетное и экспериментальное динамическое взаимодействие индентора и тканевых пластин, состоящих из 1 – 5 слоев ткани размером 10x10 см с возможностью разрушения нитей, расположенных на пластилиновом основании размером 10x10x5 см (рис. 7). Размер пакета был выбран из условия использования в расчетах персонального компьютера.

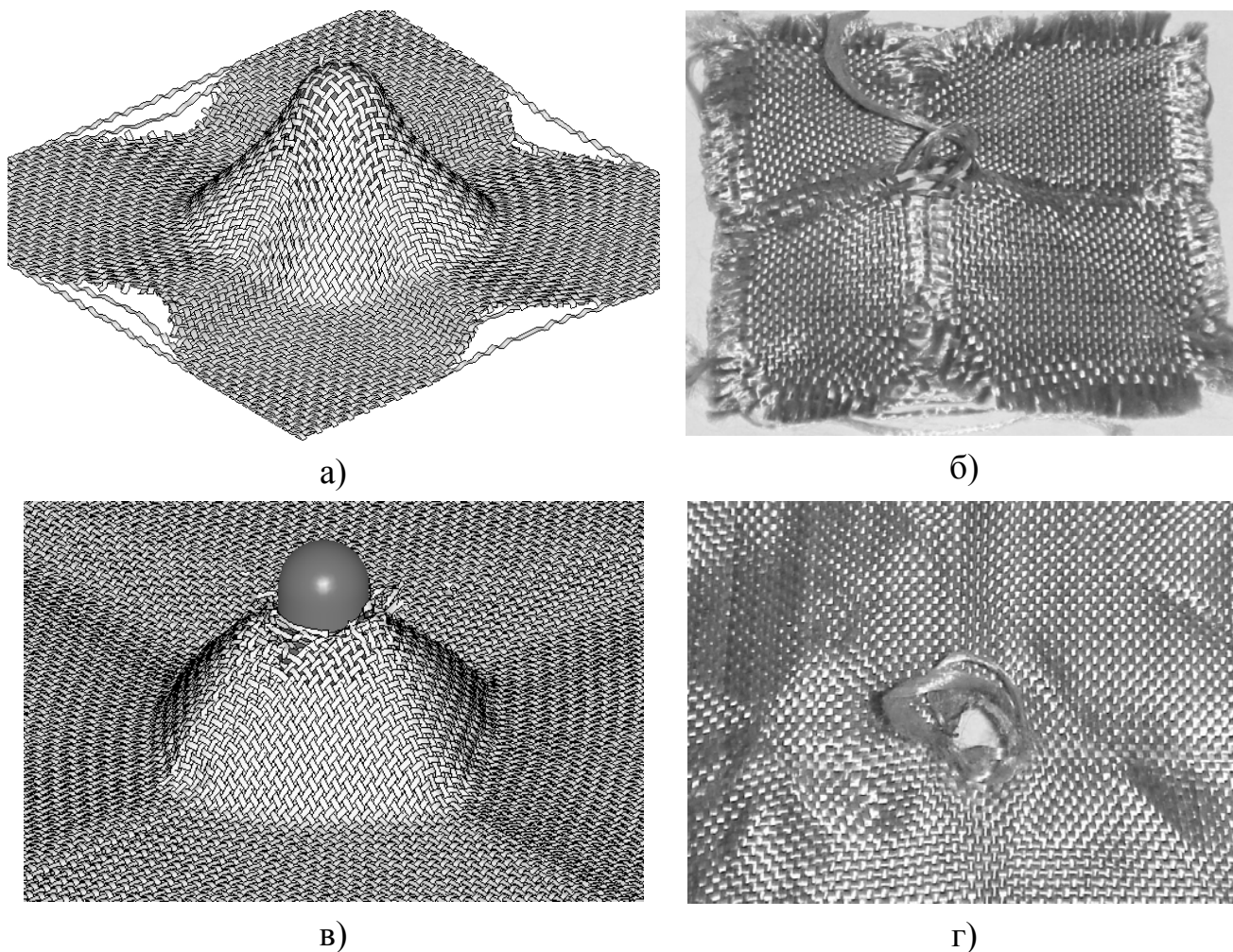


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные картины деформирования и пробоя одного слоя ткани полотняного переплетения: а) расчет, ткань 5x5 см; б) эксперимент, ткань 5x5 см; в) расчет, ткань 30x30 см; г) эксперимент, ткань 30x30 см

Индентор имел сферическую форму диаметром 4,5 мм и массой 0,5 г. Выстрелы производились из пневматического пистолета ИЖ-53 в центр пластины под прямым углом. Скорость индентора составляла 100 ± 5 м/с, ее измеряли хронографом S044 с погрешностью 1 м/с. По каждой пластине было сделано не менее 3-х выстрелов. После каждого выстрела были проведены измерения глубины отпечатка, оставленного пластиной на основании из пластилина.

Показано, что форма и размеры вмятин, полученные расчетом, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Различие расчетных и экспериментальных глубин вмятин не превышает 4%.

В пятой части были проведены расчеты динамики удара на высокопроизводительном вычислительном кластере «СКИФ Урал», оснащенном 166 вычислительными узлами с 2 процессорами Intel Xeon E5472 (4 ядра с частотой 3.0 ГГц) и 8 ГБ оперативной памяти на каждом узле. Кластер установлен в суперкомпьютерном центре ЮУрГУ.

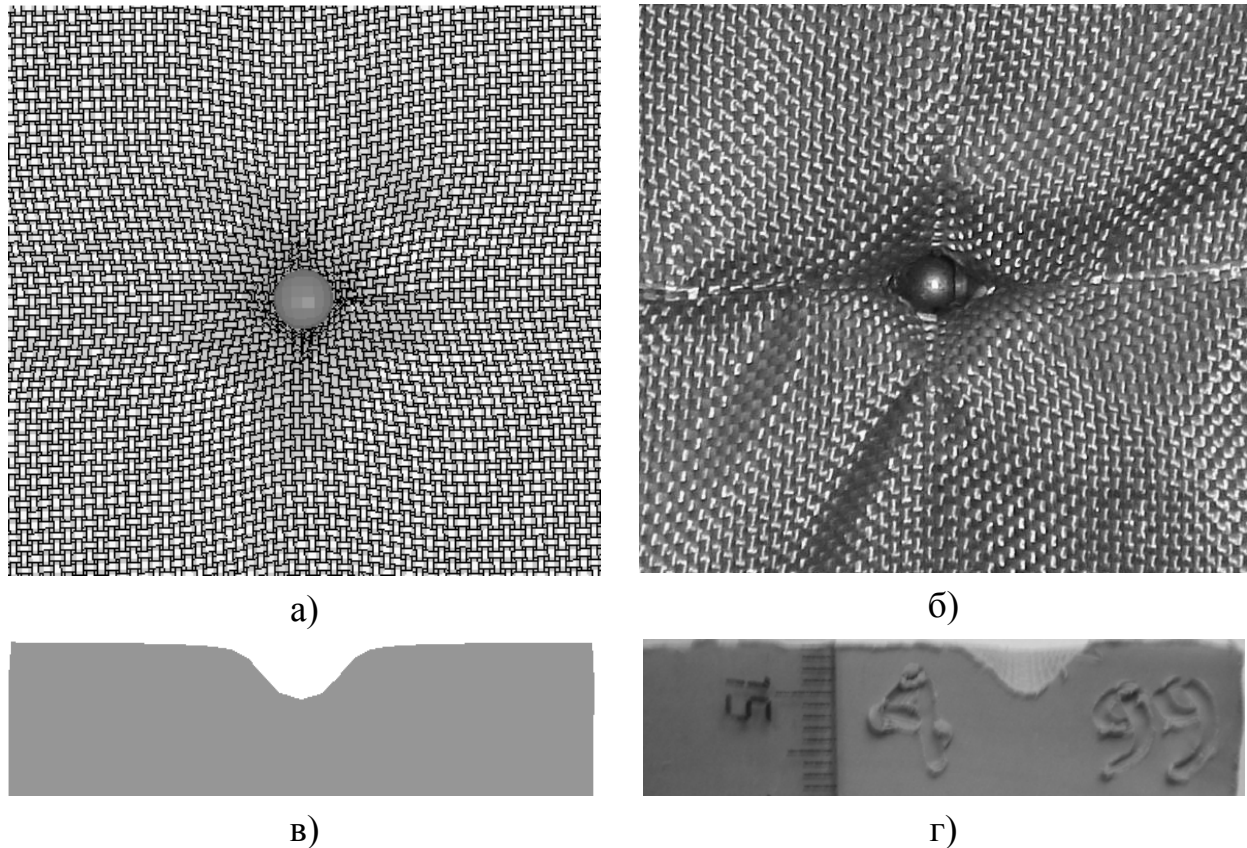


Рис. 7. Картины расчетного и экспериментального деформирования двух слоев ткани размером 10x10 см полотняного переплетения, расположенных на пластилиновом основании: а) – расчет, ткань; б) – эксперимент, ткань; в) – расчет, пластилиновое основание; г) – эксперимент, пластилиновое основание

На примере задачи удара по пластине из 5 слоев ткани размером 5x5 см полотняного переплетения индентором, имитирующим пулю пистолета ТТ со скоростью 445 м/с, были рассмотрены три различных способа декомпозиции модели на шестнадцати процессорных ядрах (нити могли разрушаться). В первом случае модель была разбита на прямоугольные области, проходящие через всю толщину пластины; во втором – на полосы, расположенные вдоль одной из сторон пластины и также проходящие через всю толщину пластины; в третьем случае – декомпозиция была проведена также на полосы, расположенные вдоль одной из сторон пластины, при этом каждую полосу разбивали еще и по толщине пластины.

Было получено, что время расчета при использовании 1-го и 2-го способов декомпозиции одинаково, а для 3-го в 2,5 раза больше, чем в первых двух. Это объясняется тем, что контакт между слоями обрабатывается на разных ядрах, что повышает межпроцессорные обмены и увеличивает время расчета. В результате все дальнейшие расчеты были проведены с использованием 1-го способа декомпозиции.

В шестой части были рассмотрены 4 типа тканевых пластин полотняного переплетения из одного и пяти слоев ткани размером 5x5 см, а также размером 30x30 см (нити могли разрушаться), скорость индентора 445 м/с (имитация пули пистолета ТТ). Расчеты были проведены с использованием одного, двух, четырех и восьми ядер с узла вычислительного кластера «СКИФ Урал». Показано сравнение ускорений при расчете с использованием одного, двух, четырех и восьми ядер с узла вычислительного кластера «СКИФ Урал». Было получено, что наилучшая масштабируемость получается при использовании четырех ядер с узла. Время расчета при использовании 4-х ядер с узла в среднем на 20% меньше по сравнению со временем расчета при использовании 1, 2, 8 ядер с узла.

Для пластин больших размеров (30x30 см) хорошая масштабируемость по сравнению с пластинами меньших размеров (5x5 см) объясняется тем, что на один процессор приходится больший объем материала и, соответственно, меньшие межпроцессорные обмены в зоне контакта индентора с тканевой пластиной, где происходит разрушение и вытягивание нитей.

В седьмой части в качестве объектов исследованы тканевые пластины, состоящие из 10 слоев ткани сатинового переплетения размером 30x30 см. Индентор имел сферическую форму диаметром 8 мм, массой 2 г. В расчетах были заданы начальные скорости V_0 и определены остаточные скорости V_r после пробоя.

Для описания характеристической кривой $V_r - V_0$ предложена новая зависимость с двумя свободными параметрами: баллистический предел V_{50} (скорость пробоя с вероятностью 50%) и коэффициент чувствительности k :

$$V_r = \begin{cases} 0, & \text{если } V_0 < V_{50}; \\ V_0 \{1 - \exp[-k(V_0 - V_{50})]\}, & \text{если } V_0 > V_{50}. \end{cases} \quad (1)$$

Эта зависимость имеет физическое обоснование, которое заключается в том, что при стремлении V_0 к бесконечности остаточная скорость индентора V_r стремится к V_0 , т.к. тканевая пластина разрушается путем разрыва нитей, без образования осколков. Параметры в выражении (1) определяли по экспериментальным данным (до 10 опытов) методом наименьших квадратов.

В этих расчетах для экономии машинных ресурсов предложена концепция замены многослойной тканевой пластины (10 слоев) на эквивалентную по массе двух- или трехслойную пластину (рис. 8).

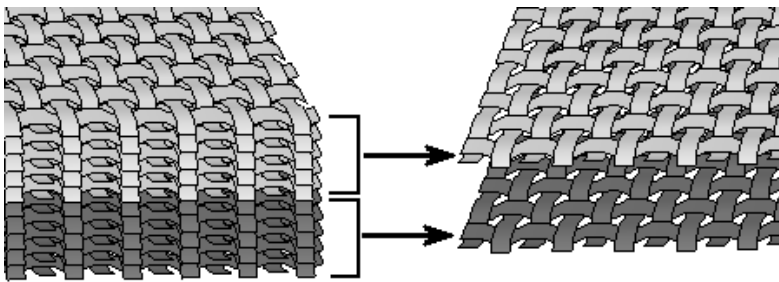


Рис. 8. Замена многослойной пластины эквивалентной по массе двухслойной пластиной

Модельные слои имели увеличенную, по сравнению с реальными, толщину (и массу) нитей. Как и ранее, слои моделировали набором нитей соответствующего типа переплетения (сатин).

Проведены эксперименты по определению характеристической кривой на лабораторном баллистическом стенде (рис. 9, обстрел стальными шариками диаметром 8 мм, массой 2 г в диапазоне скоростей 200 – 600 м/с, с замером остаточной скорости).

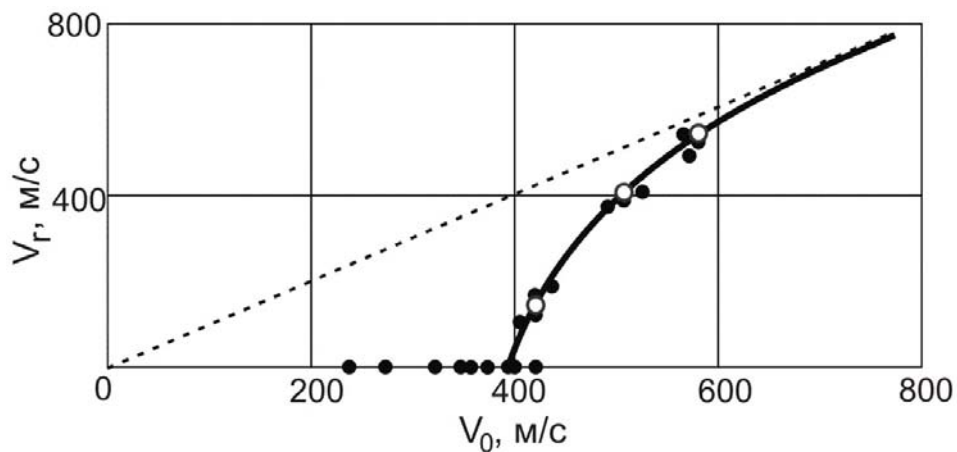


Рис. 9. Зависимость остаточной скорости индентора от начальной при пробое 10 слоев ткани сатинового переплетения размером 30x30 см. Точками отмечены экспериментальные и расчетные данные: ● – эксперимент; ○ – расчет

На рис. 10 показана картина пробоя двух эквивалентных слоев ткани размером 30x30 см сатинового переплетения. Различие расчетных и экспериментальных данных баллистического предела и остаточных скоростей для всех случаев не превысило 4%. Замена многослойной пластины (10 слоев) на эквивалентную по массе однослойную пластину дает большее расхождение с экспериментальными данными (15%), а замена на трехслойную эквивалентную пластину дает результаты близкие к результатам для двухслойной эквивалентной пластины.

В восьмой части разработаны рекомендации для практики. На кластере «СКИФ Урал» были проведены расчеты четырех различных тканевых пластин размером 30х30 см с удельной массой 10 кг/м², расположенных на основании из технического пластилина. Скорость индентора 445 м/с (имитация пули пистолета ТТ). Реальная многослойная пластина была заменена пятью эквивалентными по массе слоями. В первом случае была рассмотрена пластина, состоящая только из тканей полотняного переплетения. Во втором – из тканей саржевого переплетения. Третья пластина имела 1/3 наружных слоев полотняного переплетения, 1/3 средних слоев саржевого и 1/3 нижних слоев сатинового переплетений. Четвертая пластина имела 1/3 наружных слоев сатинового переплетения, 1/3 средних слоев саржевого и 1/3 нижних слоев полотняного переплетений. Было проведено измерение глубины вмятины, оставленной четырьмя различными пластинами, в основании из технического пластилина. Минимальный размер вмятины получается при использовании 4-го типа пластины. Затем был проведен расчет пятой пластины (аналог четвертой), в которой 1/3 верхних слоев сатинового переплетения располагались с зазором 5 мм выше остальных слоев. Было получено, что глубина вмятины меньше на 20%, чем при использовании этого же пакета без зазора.

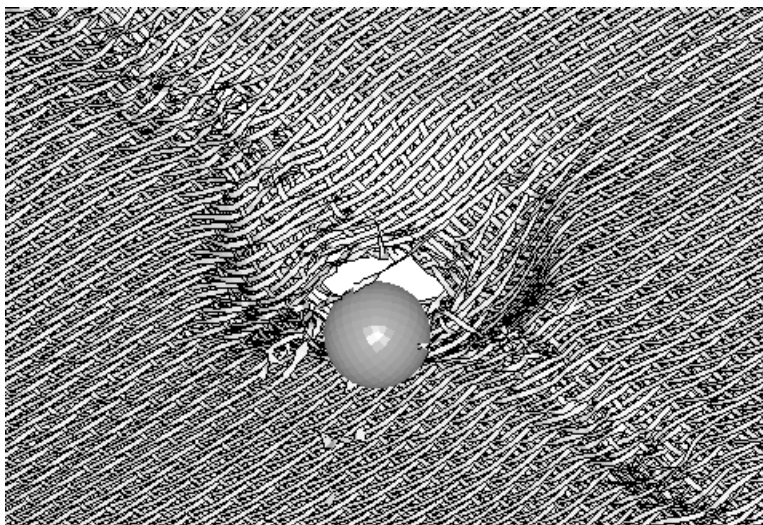


Рис. 10. Картина пробоя двух эквивалентных слоев ткани размером 30х30 см сатинового переплетения

Общая рекомендация такова: для эффективной работы многослойной тканевой пластины необходимо использовать градиентные структуры. В них верхние слои должны иметь меньшую искривленность нитей (например, сатин), напряжения в нитях тканей такого переплетения меньше, чем в тканях с саржевым и полотняным переплетениями; коэффициент трения в верхних

слоях должен быть снижен, чтобы уменьшить влияние на прочность нитей сверхзвукового удара в начальной фазе контакта с индентором; тыльные слои должны быть выполнены из тканей с максимальной искривленностью нитей, например, с полотняным переплетением и высоким коэффициентом трения между нитями, чтобы увеличить энергию на вытягивание нитей; между наружными и тыльными слоями многослойной тканевой пластины рационально выполнить зазор, чтобы

дополнительно снизить скорость индентора за счет потерь на трение при вытягивании нитей в наружных слоях.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Определены механические характеристики арамидных нитей Русар® номинальной линейной плотности 58,8 текс и регистрирующей среды (технического пластилина). Получено, что нить ведет себя упруго вплоть до разрушения с модулем упругости $E = 140 \pm 5$ ГПа и пределом прочности $\sigma_B = 3,0 \pm 0,16$ ГПа. Экспериментальные исследования показали, что материал технического пластилина является упругопластическим с зависимостью предела текучести от скорости деформирования. Модуль упругости технического пластилина $E = 0,7 \pm 0,1$ МПа, плотность $\rho \approx 1800$ кг/м³, зависимость предела текучести σ_T (МПа) от скорости деформирования $\dot{\epsilon}$ имеет вид $\sigma_T(\dot{\epsilon}) \approx 0,94(\dot{\epsilon})^{0,15}$.

2. Впервые разработаны малопараметрические модели тканевых структур, позволившие построить простейшую адекватную модель ткани с плоским переплетением (полотно, саржа, сатин).

3. В пакете программ LS-DYNA впервые получено решение задачи динамического деформирования и разрушения одного слоя ткани полотняного, саржевого и сатинового переплетений размерами 5x5, 10x10, 20x20, 30x30 см. Индентор имел скорость 445 м/с. При исследовании ударного нагружения тканей без учета разрушения нитей получено, что темп роста первых главных напряжений зависит от характера переплетения нитей, а также размера ткани (больше размер – выше уровень напряжений в ней).

При исследовании ударного нагружения тканей с учетом разрушения нитей получено, что ткани размером 5x5 см не пробиваются. Ткани размером больше, чем 5x5 см саржевого и полотняного переплетений пробиваются, причем потеря скорости в случае саржевого переплетения выше, чем в случае полотняного на 1...22% в зависимости от размера ткани. Потеря скорости в случае тканей с сатиновым переплетением во всех случаях ниже, т.к. индентор раздвигает нити.

4. Рассмотрены несколько случаев динамического нагружения индентором одного слоя ткани сатинового переплетения размером 30x30 см под разными углами к нормали поверхности ткани. Самым опасным оказался случай в 30° к нормали, но если снизить до нуля коэффициент трения между тканью и индентором, то самым опасным будет случай нагружения по нормали.

5. Моделирование процессов динамического нагружения многослойных пластин реальных размеров (30x30 см) с использованием технологии параллельных

вычислений (это задачи с множественными контактами) показало, что увеличение количества ядер не влечет за собой такое же уменьшение времени расчета (нелинейная масштабируемость). С определенного момента дальнейшее увеличение количества ядер дает минимальный выигрыш во времени счета, а последующее наращивание количества ядер приводит уже к увеличению времени расчета (увеличивается количество межпроцессорных обменов). В результате проведенных исследований по масштабируемости, было получено, что декомпозицию объектов необходимо обеспечивать таким образом, чтобы контактные зоны приходились на минимальное количество ядер, назначать минимально возможное количество контактирующих объектов.

6. Для более эффективного использования компьютерных ресурсов впервые была предложена концепция замены группы слоев в многослойной тканевой пластине эквивалентной по массе двух- или трехслойной пластиной, в которой слои имеют возможность разрушения.

7. Для описания характеристической кривой «скорость удара V_0 – остаточная скорость V_r » предложена новая зависимость с двумя свободными параметрами: баллистический предел V_{50} и коэффициент чувствительности k . Численные и экспериментальные данные при определении баллистического предела хорошо согласуются между собой (разница не превышает 4% для всех рассмотренных случаев).

8. При разработке новых более эффективных по массе многослойных тканевых пластин необходимо использовать градиентные структуры: в верхних слоях нити должны быть минимально искривлены, т.к. напряжения в более прямых нитях ниже, чем в более искривленных; коэффициент трения в верхних слоях должен быть снижен, чтобы уменьшить влияние сверхзвукового удара; тыльные слои должны быть выполнены из тканей с сильно искривленными нитями и высоким коэффициентом трения, чтобы увеличить энергию на вытягивание нитей; между наружными и тыльными слоями многослойных тканевых пластин нужно сделать зазор, чтобы снизить скорость индентора за счет вытягивания нитей в наружных слоях.

Публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в научных журналах из Перечня ВАК

1. Долганина, Н.Ю. Оценка баллистического предела и прогиба многослойных тканевых пластин при ударе индентором / Н.Ю. Долганина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2010. – Вып. 15. – № 10(186). – С. 17–23.

2. Долганина, Н.Ю. Моделирование ударных процессов в тканевых бронезилетах и теле человека на вычислительном кластере «СКИФ Урал» / Н.Ю. Долганина, С.Б. Сапожников, А.А. Маричева // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии. – 2010. – Т. 11. – С. 117–126.

Другие публикации

3. Долганина, Н.Ю. Оценка баллистического предела тканевых бронепакетов и тупой травмы тела человека / Н.Ю. Долганина // Компьютерный инженерный анализ: материалы 4-й Российской научно-технической конференции. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – С. 48–49.

4. Sapozhnikov, S.B. Improved methodology for ballistic limit and blunt trauma estimation for use with hybrid metal/textile body armor / S.B. Sapozhnikov, M.V. Forental, N.Yu. Dolganina // Proceeding of conference “Finite element modelling of textiles and textile composites”. – St-Petersburg, 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

5. Долганина, Н.Ю. Влияние типа переплетения нитей на прочность тканей при локальном ударе / Н.Ю. Долганина, С.Б. Сапожников // Зимняя школа по механике сплошных сред (четырнадцатая). Тезисы докладов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – С. 102.

6. Сапожников, С.Б. Моделирование динамики взаимодействия ударника и многослойного тканевого пакета / С.Б. Сапожников, Н.Ю. Долганина, С.А. Сахаров // Вопросы оборонной техники. Серия «Композиционные и неметаллические материалы в машиностроении». – 2005. – Вып. 3(140)–4(141). – С. 38–41.

7. Долганина, Н.Ю. Численное и экспериментальное исследование динамического взаимодействия ударника и многослойного тканевого пакета на упруго-вязко-пластическом основании / Н.Ю. Долганина, С.Б. Сапожников // Вестник УГТУ-УПИ. Компьютерный инженерный анализ. – 2005. – № 11(63) – С. 91–97.

8. Долганина, Н.Ю. Связь динамической прочности арамидных тканей с искривлением нитей в них / Н.Ю. Долганина, С.Б. Сапожников // Наука и технологии: тр. XXV Российской школы и XXXV Уральского семинара, посвященных 60-летию Победы. – М.: РАН, 2005. – С. 103–110.