

УДК 621.452.3-2262:539.4

Разработка конструкции комбинированного корпуса и расчет его динамической прочности в случае обрыва лопатки ротора

Крундаева А. Н.*, Шмотин Ю. Н.**

Научно производственное объединение «Сатурн»,

пр. Ленина, 163, Рыбинск, 152903, Россия

** e-mail: anastas_siy@mail.ru*

*** e-mail: yuri.shmotin@npo-saturn.ru*

Аннотация

Для решения задачи локализации фрагментов лопатки при ее аварийном обрыве была разработана конструкция комбинированного корпуса, которая состоит из металлической основы и слоя плотно намотанных на металлическую основу непропитанных арамидных нитей.

Основным назначением комбинированного корпуса является недопущение повреждения конструкции самолета оборвавшимися в результате аварии фрагментами разрушившегося компрессора, в том числе оторвавшейся лопаткой или ее фрагментом.

В рамках этой работы создана робастная конечно-элементная методология моделирования комбинированного корпуса, в которой предложен подход для моделирования намотки непропитанных арамидных нитей. Реализована методика построения и настройки компьютерной системы на базе трехмерного программного кода LS-DYNA, обеспечивающая достоверное моделирование многослойных

композиционных материалов, применяемых в защитных системах двигателей для локализации оборвавшейся лопатки.

Разработанная численная технология расчета динамического деформирования элементов конструкции верифицирована по результатам натурных испытаний.

Ключевые слова: комбинированный корпус, непропитанная арамидная ткань, деформирование, обрыв лопатки, прочность, бронезащита, расчет, метод конечных элементов

Введение

В соответствии с американскими национальными нормами FAR-25, европейскими нормами JAR-25 и нормами Российской Федерации АП-33 двигатели современных самолетов должны быть спроектированы таким образом, чтобы при разрушении (обрыве) лопатки вентилятора в результате попадания птицы, любого постороннего предмета или вследствие накопления усталостной поврежденности свести повреждение в двигателе к минимально возможным. Конструкция корпуса должна сохранять прочность при интенсивном динамическом воздействии от удара лопатки.

Одним из возможных вариантов решения проблемы повышения надежности и снижения массы корпуса является использование комбинированных корпусов, конструкция которых состоит из материалов, обладающих высокой поглощающей способностью и минимальной массой.

Конструкция комбинированного корпуса

Основу комбинированного корпуса вентилятора должен составлять материал, обладающий высокой жесткостью. Предназначение данного слоя: описать форму

проточной части вентилятора и увеличить площадь контакта оборвавшейся части лопатки со вторым слоем материала. Второй слой бронезащиты изготавливается из материала обладающего высокими демпфирующими и энергопоглощающими характеристиками. Его предназначение состоит в том, чтобы поглотить энергию оборвавшихся фрагментов лопатки.

Предварительный выбор материалов для комбинированного корпуса

Основу комбинированного корпуса вентилятора предлагается изготовить из титанового сплава. Этот материал довольно легковесный и прочный.

По известным параметрам оборвавшегося фрагмента: периметр периферийной части оборвавшегося фрагмента P , площадь периферийной части оборвавшегося фрагмента S , массе M и скорости V . Можно вычислить кинетическую энергию оборвавшегося фрагмента T . Так же известно, что фрагмент лопатки развернут относительно кольцевой координаты бронезащиты на угол α .

Отличительной чертой заданного ударного воздействия является очень высокий уровень кинетической энергии T . Поэтому, предлагаемая конструкция бронезащиты обязательно должна содержать слой, обладающий высокой энергоёмкостью материала.

Масштабные исследования, проведённые ОАО «НПО «Сатурн» в кооперации с ведущими отечественными предприятиями в области изучения динамики оболочечных конструкций при импульсном нагружении, показали, что наибольшей массовой эффективностью в плане энергопоглощения (в фазе растяжения) при импульсном нагружении обладают конструкции изготовленные из арамидных

волокон. Кроме того, арамидные волокна обладают высокими «бронезащитными» свойствами.

Используя результаты работы Баженова [1], можно посчитать поглощение энергии арамидным волокном:

Импульс в волокне определяется по формуле:

$$\sigma = \rho \cdot v \cdot c, \quad (1)$$

где ρ - плотность волокна; v – скорость пули; c - скорость звука в волокне, связанная с модулем упругости E классической формулой:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2)$$

подставив 2 в 1, получаем:

$$\sigma = v \cdot \sqrt{E \cdot \rho} \quad (3)$$

Волокно разрушается, когда напряжения достигают предела прочности волокна σ^* . Критическая скорость, при которой происходит обрыв волокна находится из формулы:

$$v^* = \frac{\sigma^*}{\sqrt{E \cdot \rho}} \quad (4)$$

Полная энергия диссипации нити единичного поперечного сечения – $K = T + W + P$, где T – кинетическая энергия; W – энергия упругой деформации; P – энергия, расходуемая на вытягивание нити из полотна. Для промежуточных скоростей удара ($v^*/3 < v < v^*$) динамические эффекты доминируют и значением P можно пренебречь. С учетом (3) полная энергия определяется по формуле:

$$T = \left(\frac{\rho \cdot v^2}{2} + \frac{\sigma^2}{2E} \right) \cdot L \quad (5)$$

где L – длина нити. Подставляем (1) и (2) в (5), получаем:

$$T = \rho \cdot v^2 \cdot L \quad (6)$$

Сравнение (5) и (6) показывает, что при продольном ударе (в условиях стеснения поперечной деформации) кинетическая энергия равна энергии упругой деформации нити.

Приравняв кинетическую энергию ударника $M \cdot V^2 / 2$, где M – масса ударника, диссипируемой энергии Q , определим минимально необходимое количество слоев намотки:

$$Q = \frac{M}{2 \cdot S \cdot L \cdot N \cdot \rho} \quad (7)$$

где F – сечение нити, N количество нитей, диссипирующих энергию.

Когда скорость удара превышает критическое значение, в момент удара происходит обрыв нитей. При этом длина нити становится равной диаметру ударника. Как следствие, защитные характеристики намотки катастрофически падают.

Количество необходимых слоев ткани увеличивается, с уменьшением длины вытаскиваемой нити, которая ограничена так называемой неэффективной длиной волокна. Именно поэтому ткани обладают меньшей энергопоглощающей способностью. В тканях волокнам сложнее вытягиваться, их задерживают соседние волокна. Из-за плотного прилегания нитей в плетении ткани происходит более быстрое разрушение волокон, что не наблюдается у свободно намотанных нитей.

Именно поэтому в работе предложен вариант намотки непропитанными арамидными нитями.

Как показывают теоретические исследования, особенно эффективно арамидные материалы должны работать при скоростях внедрения поражающего элемента до 350 м/с. В данном диапазоне скоростей арамидные волокна успевают вытягиваться за поражающим элементом, без их «перерезания» (среза). Так как в исследуемом случае диапазон скоростей соударения составляет до 330 м/с, то можно утверждать, что применение арамидных волокон в разрабатываемой защите будет оправдано. В качестве энергопоглощающего слоя предлагается ввести намотку из непропитанных арамидных нитей, толщина намотки (в среднем) порядка $\delta_1 \sim 16$ мм.

Исследование свойств материалов комбинированного корпуса

Проведение расчетных исследований динамики взаимодействия ударников и бронезащиты, цель которых определение оптимальных характеристик конструкции бронезащиты и минимизация ее массы без потери защитных свойств, требует наличия данных о механических характеристиках всех материалов, входящих в конструкцию взаимодействующих объектов.

В то время как динамические характеристики материалов, составляющих металлические части бронезащиты, достаточно хорошо известны, аналогичные характеристики арамидных нитей изучены слабо.

В рамках выполняемой работы основные данные по свойствам нитей были получены из проведенных экспериментов на разрывной машине. Из-за отсутствия

информации по динамическим свойствам для нитей, кривые деформирования и необходимые коэффициенты трения, демпфирования получены из аппроксимации данных по нитям Кевлав 49 [2, 3].

Методы моделирования непропитанных арамидных материалов

Методы, которые успешно используются для расчета многослойных арамидных материалов, являются аналитическими, включая метод конечных объемов [4], классическую теорию слоистой конструкции [5], и численные методы, использующие моделирование по методу конечных элементов с виртуальным испытанием [6]. Недавно был достигнут успех в разработке нелинейных моделей материалов для имитации простых конструкционных явлений, таких как испытания на одноосное растяжение, и для имитации сложных структурных явлений, таких как явления с баллистическим воздействием [7]. В обоих случаях большинство моделей материалов были разработаны для численного анализа методом конечных элементов. Однако некоторые модели были разработаны по методу конечных разностей [8]. Также было выполнено исследование влияния скорости деформации на арамидные тканевые материалы и ткани [9 и 10].

В современном мире для описания физических процессов широкое распространение получил метод конечных элементов.

Метод конечных элементов (КЭ) включает в себя моделирование фактической геометрии нити. Затем с использованием созданной модели проводятся виртуальные испытания путем изменения условий нагрузки и пограничных условий, а результаты расчетов используются для определения эффективных свойств материала. Численный анализ модели методом конечных элементов является более

дорогостоящим средством в вычислительном отношении по сравнению с использованием иных методов решения. Однако модели, созданные по методу конечных элементов, позволяют детально увидеть распространения деформации и напряжения, и что самое важное позволяют моделировать нужную структуру переплетения нитей в ткани.

Использование изображений с высоким разрешением, таких как микрофотография (рисунок 1 [11,12]), дает микроскопическое представление геометрии нити. Исследователи смогли подобрать математические функции к этим изображениям для подробного моделирования образца ткацкого переплетения.

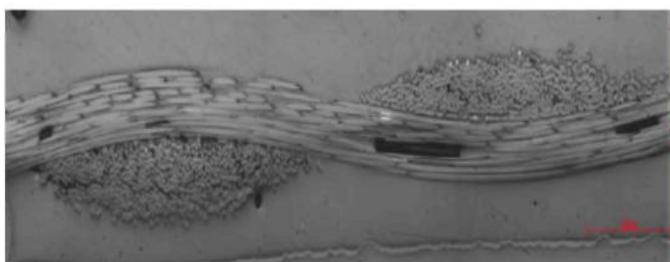


Рис. 1 Микрофотографическое изображение ткани, подобной Кевлару, в поперечном сечении [11, 12]

Выделяют три способа моделирования непропитанных нитей и тканей:

1 способ моделирования – микромеханический: микромеханический подход рассматривает фактическую геометрию ткани, моделируя каждую индивидуальную нить и модель ее ткацкого переплетения с твердым (solid) конечным элементом (рисунок 2).

2 способ моделирования – методика элементарной ячейки, где поведение периодически повторяющейся геометрической ячейки определено и связано с непрерывным элементом, таким как оболочка, мембрана или твердый элемент.

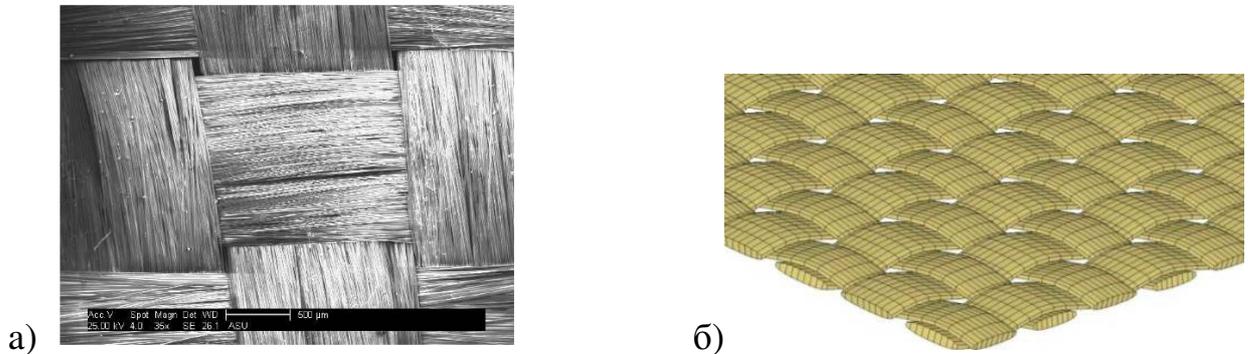


Рисунок 2 – Микромеханический подход КЭ моделирования ткани [10]
а) Микроструктура тканного материала Кевлар,
б) Микромеханическая модель Кевлара по методу конечных элементов

3 способ моделирования – ткань ведет себя как непрерывный материал, свойства которой усреднены по всей области, для которой используется ортотропные модели поведения (рисунок 3).

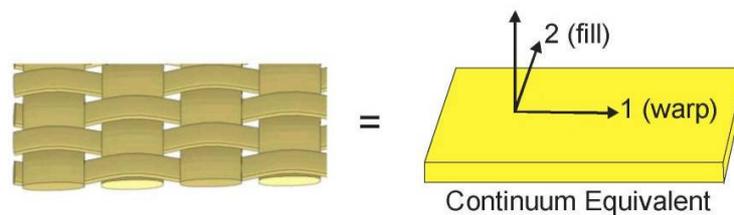


Рисунок 3 – Моделирование ткани в виде континуум модели [10]

Анализируя существующие варианты методов моделирования непропитанных арамидных нитей и тканей, можно сделать вывод: непрактично создавать модели по методу конечных элементов из сухих тканей, которые включают в себя детали геометрии нити на уровне мезомасштаба для использования в анализе баллистических явлений – модель по методу конечных элементов была бы слишком большой и детализированной. Поэтому был разработан новый подход

моделирования непропитанных арамидных нитей, для которого создали эквивалентную континуум-модель на уровне макромасштаба, причем для моделирования намотки в виде нитей построили модель из лент, которая описывает механизм поведения пучков нитей.

Основываясь на этом, предложена конечно-элементная модель непропитанных арамидных нитей: нити намотки моделируются в виде спирально навитой ленты с заданной шириной и толщиной. Лента наматывается на металлическую основу корпуса. В каждом из слоев намотки по ширине намоточной части имитатора корпуса укладывается несколько витков ленты, моделирующей совокупность нитей (рисунок 4).

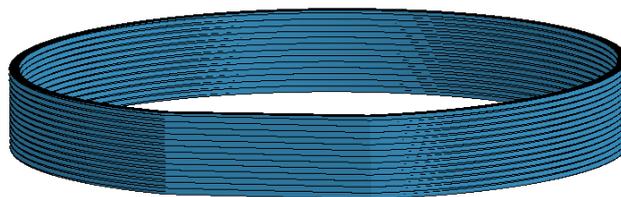


Рисунок 4 – Нити намотки в виде спирально навитой ленты

При проведении расчетов учитывается разрушение ленты при достижении максимальной главной деформацией ε_1 величины относительного удлинения нити на разрыв δ .

Деформирование нитей описывается на основе диаграмм деформирования, полученных в результате испытаний образцов.

Расчет динамического нагружения нитей проводился в программном продукте LS-DYNA [7]. Для описания поведения лент непропитанных арамидных нитей используется модель материала *MAT_FABRIC. Она является вариантом модели многослойного ортотропного композиционного материала. Модель включает не

только определяющие уравнения, но и соотношения для специального мембранного элемента, который подходит для расчета характеристик тканевых материалов в условиях больших деформаций. В случае моделирования непропитанной арамидной намотки, в модели *MAT_FABRIC задаются свойства только в окружном направлении. Сама намотка моделируется shell элементами.

Установка для верификации разработанной модели

Из-за дороговизны экспериментов с применением комбинированного корпуса на двигателе было принято решение на начальном этапе сделать стенд для верификации математической модели намотки (рисунок 5).

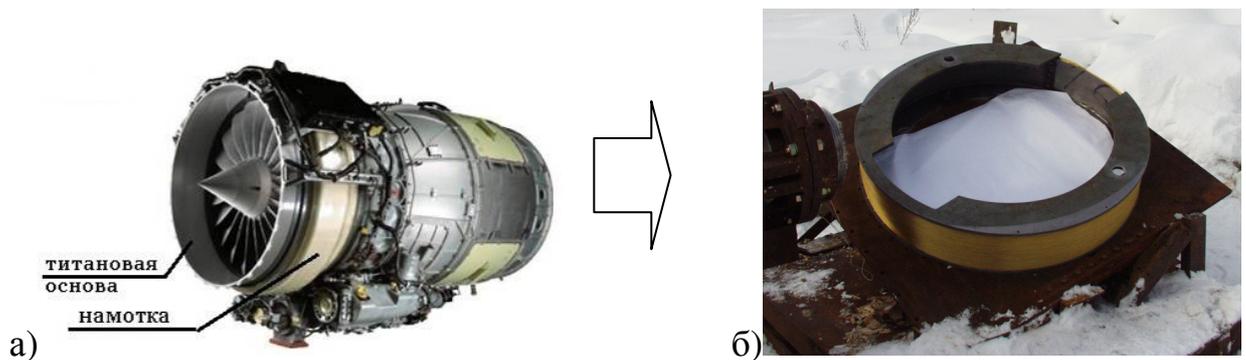


Рисунок 5 – Замена комбинированного корпуса имитатором
*а) двигатель с комбинированным корпусом,
б) испытательный стенд с имитатором комбинированного корпуса*

Модель комбинированного корпуса была создана с отверстием в металлической основе, на эту основу были намотаны непропитанные арамидные нити.

Поражающий элемент (фрагмент) разрушившегося компрессора представлял прямоугольную пластину.

Во время проведения всех экспериментов осуществлялась видеосъемка процесса соударения ударника и имитатора бронезащиты, контроль скорости полета ударника и контроль запреградной скорости ударника

Верификация расчетов по результатам экспериментов

Для верификации расчетов создана конечно-элементная модель имитатора корпуса, поверх которой выполнена намотка из непропитанных арамидных нитей для двух вариантов намотки 8 мм и 16мм (рисунок 6).

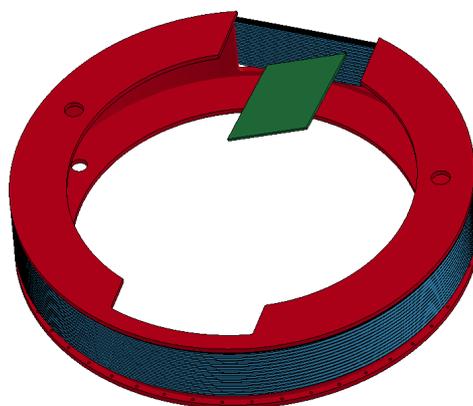


Рисунок 6 – Имитатор комбинированного корпуса с выпиленным отверстием

Все нагрузки и ограничения максимально приближены к условиям на двигателе. Скорость полета ударника для обоих вариантов равна 330 м/с.

В модели учитывается контактное взаимодействие элементов конструкции как друг с другом, так и самих с собой в результате собственной деформации. Начальные условия задаются в виде равномерно распределенного векторного поля скорости ударника в направлении имитатора корпуса.

В качестве граничных условий используется жесткое закрепление имитатора корпуса по отверстиям под винты крепления в его нижнем фланце.

Результаты расчета намотки в 8 мм представлены на рисунке 7. Анализ полученных результатов показывает, что в результате воздействия ударника происходит пробитие бронезащитной намотки корпуса. При этом часть нитей намотки разрывается, а часть сохраняет прочность, но соскальзывает с ударника. Остаточная скорость ударника после пробития намотки составляет ~55 м/с (рисунок 7). Значение остаточной кинетической энергии ударника определяется величиной 4.9 кДж, что составляет 7.9% от начального значения.

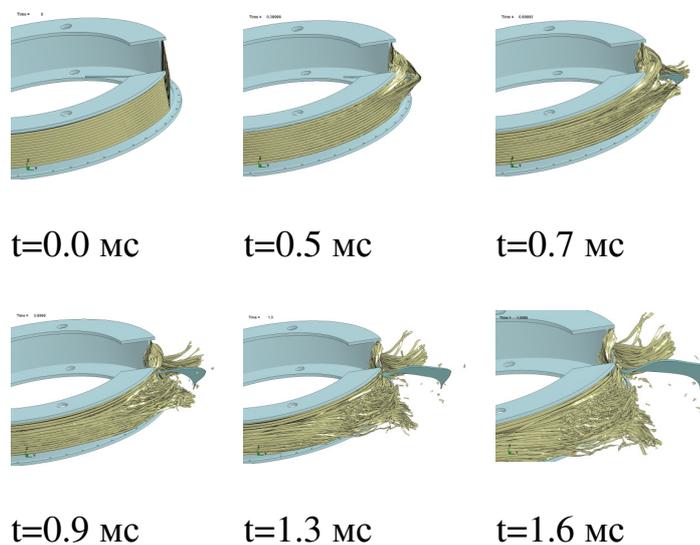


Рисунок 7 – Взаимодействие ударника и намотки 8мм

Результаты расчета намотки в 16 мм представлены на рисунке 8. Анализ полученных результатов показывает, что ударник пробивает лишь часть непропитанной арамидной намотки. Нити, расположенные с краев намотки, разрываются, однако центральная часть непропитанной арамидной намотки сохраняет целостность. Остаточная скорость ударника после отскока составляет ~18 м/с, вектор скорости направлен к центру имитатора корпуса. Значение остаточной кинетической энергии ударника определяется величиной 1.6 кДж, что составляет 2.7% от начального значения.

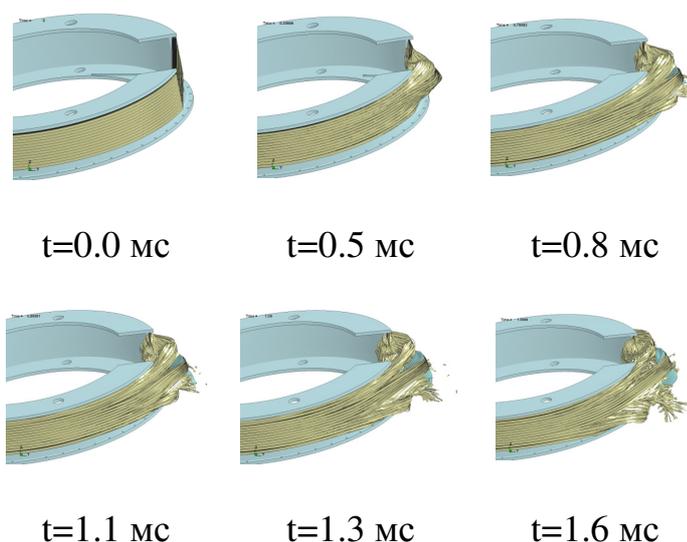


Рисунок 8 – Взаимодействие ударника и намотки 16мм

Верификация результатов расчета с экспериментом производилась по величине запреградной скорости ударника, по деформации ударника после взаимодействия с намоткой, так же для анализа был произведен подсчет нитей оборвавшихся после взаимодействия с ударником.

Сравнительный анализ результатов расчетов и экспериментов показывает, что разработанная расчетная схема и предложенная технология численного моделирования с использованием данных по динамическим свойствам арамидной нити позволяет получить результаты, качественно (пробитие или непробитие намотки) согласующиеся с полученными экспериментальными данными. На рисунке 9 показано расчетное и экспериментальное конечные состояния защитной намотки из арамидных нитей в опыте 1 (в этом опыте толщина намотки из непропитанных арамидных нитей равна 8 мм и по результатам эксперимента намотка не удержала имитатор лопатки). Сравнительный анализ конечных состояний показывает, что расчетная и экспериментальная картины непротиворечивы и относительно близки друг к другу. Видно, что в расчете и в

эксперименте намотка значительно сильнее «размахрилась» с правой стороны конструкции. Также можно отметить, что в расчете и в эксперименте верхняя и нижняя трети ширины намотки сохранили прочность, а средняя часть разрушилась, что привело к вылету ударника.

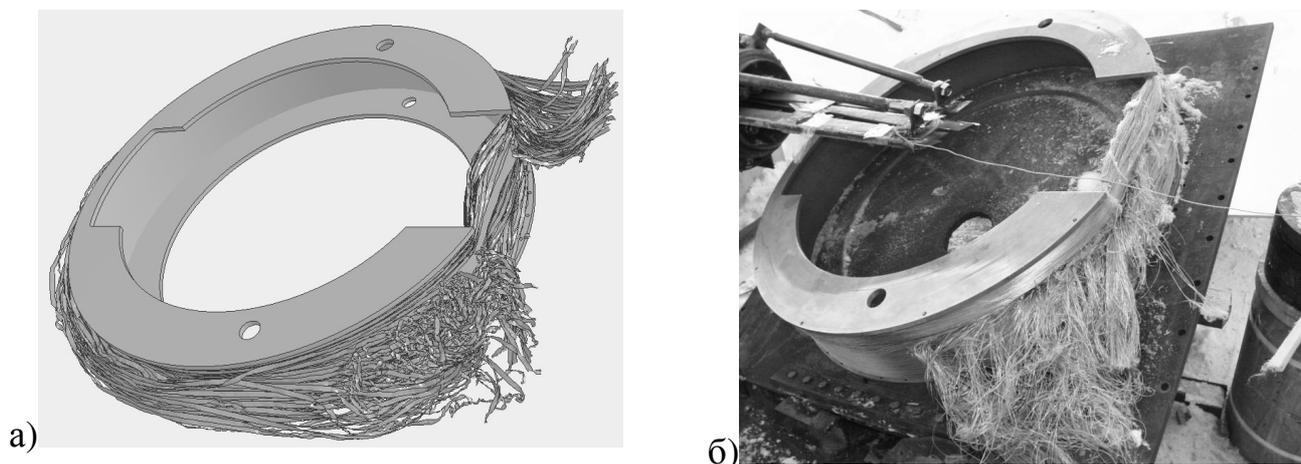


Рисунок 9 – Расчетное и экспериментальное конечное состояние намотки в опыте 1 $t=2$ мс

а) расчет, б) результаты эксперимента

На рисунках 10 показаны расчетное и экспериментальное конечное состояние защитной намотки из арамидных нитей в опыте 2 (в этом опыте толщина намотки из непропитанных арамидных нитей равна 16 мм и по результатам эксперимента намотка удержала имитатор лопатки). Сравнение расчетного и экспериментального промежуточных состояний намотки показывает, что в расчете также как и в эксперименте на начальной стадии взаимодействия ударника с намоткой происходит процесс вытягивания нитей с образованием характерного локального «набухания» слоя намотки без видимого разрушения. Вид конечных состояний на рисунке 13 позволяет увидеть, что в опыте 2 намотка «размахрилась» меньше, чем в опыте 1. Сравнение конечных состояний показывает, что расчетное и

экспериментальное состояния также непротиворечивы. При этом отметим, что и по результатам расчета опыта 2 намотка «размахрилась» меньше, чем в опыте 1.

Как показывают расчеты и эксперимент для исключения «перерезания» ниток необходимо добавить металлическую основу корпуса.

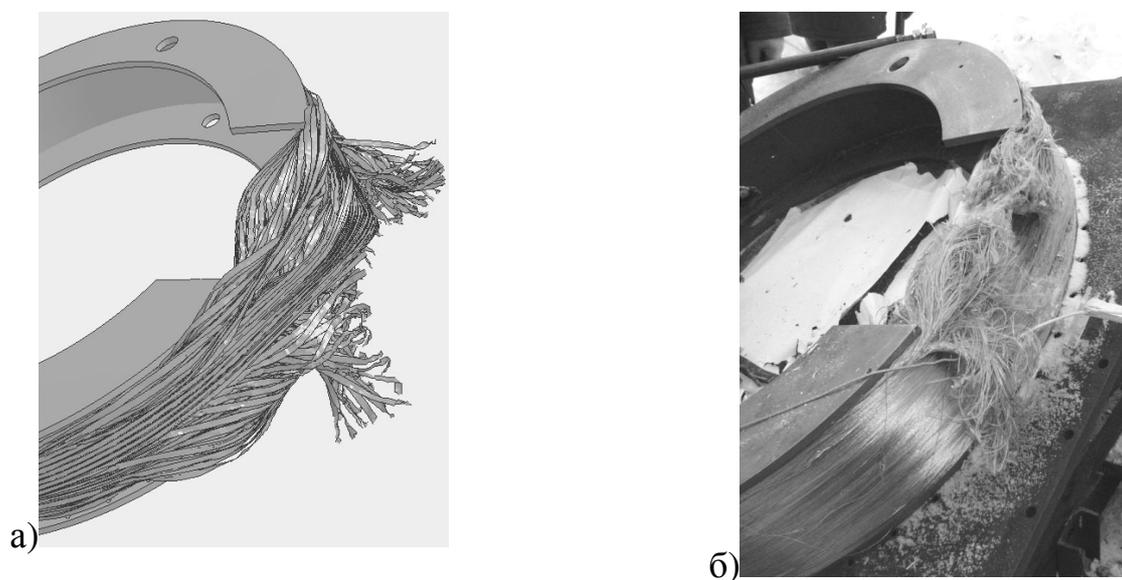


Рисунок 10 – Расчетное и экспериментальное конечное состояние намотки в опыте 2 $t=2$ мс
а) расчет, б) результаты эксперимента

На заключительном этапе работы был спроектирован комбинированный корпус и проведен его расчет по верифицированной модели в условиях работы двигателя.

Анализ результатов расчета показал: комбинированный корпус с намоткой в 8 мм удерживает оборвавшуюся лопатку вентилятора. Массе комбинированного корпуса получилась легче цельнометаллического на 15%.

Заключение

В работе предложен новый подход для моделирования намотки непропитанных арамидных нитей. Изучены свойства нитей. Реализована методика

построения и настройки компьютерной системы на базе трехмерного программного кода LS-DYNA, обеспечивающая достоверное моделирование многослойных композиционных материалов, применяемых в защитных системах двигателей для локализации оборвавшейся лопатки. Разработанная методика расчета динамического деформирования элементов конструкции верифицирована по результатам натурных испытаний и не имеет аналогов.

Библиографический список

1. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. “Поглощение энергии арамидным волокном” // Полимерные композиционные материалы. Прочность и технология, Долгопрудный, Интеллект, 2010, с 104-121.
2. Xia Y., Wang, Y. The Effects of Strain Rate on the Mechanical Behavior of Kevlar Fibre Bundles: An Experimental and Theoretical Study, Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, 1998, vol. 29A, pp. 1411-15.
3. Xia Y., Wang, Y. Experimental and Theoretical Study on the Strain Rate and Temperature Dependence of Mechanical Behavior of Kevlar Fibre, Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, 1999, vol. 30, pp. 1251-57.
4. Tabiei A., Yi W. Comparative Study of Predictive Methods for Woven Fabric Composite Elastic Properties, Journal of Composites and Structures, 2002, vol. 58, pp. 149-64.
5. Scida D., Aboura Z., Benzeggagh M.L., Bocherens E. A Micromechanics Model for 3D Elasticity and Failure of Woven-Fibre Composite Materials, Journal of Composite Science and Technology, 1999, vol. 59, pp. 505-17.
6. Peng X.Q., Cao J. Numerical Determination of Mechanical Elastic Constants of Textile Composites, 15th Annual Technical Conference of the American Society for Composites, College Station, Texas, 2000.

7. Tabiei A. and Ivanov I. "Computational Micro-Mechanical Model of Flexible Woven Fabric for Finite Element Impact Simulation" 7th International LS-DYNA Users Conference, 2002, pp. 8-15 to 8-40.
8. Roylance D., Chammas P., Ting J., Chi H. and Scott B. "Numerical Modeling of Fabric Impact" Proceedings of the National Meeting of the American Society of Mechanical Engineers (ASME), San Fransisco, California, 1995.
9. Xia Y. and Wang Y. "The Effects of Strain Rate on the Mechanical Behavior of Kevlar Fibre Bundles: An Experimental and Theoretical Study" Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 29A, 1998, pp. 1411-15.
10. Xia Y. and Wang Y., "Experimental and Theoretical Study on the Strain Rate and Temperature Dependence of Mechanical Behavior of Kevlar Fibre" Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 30, 1999, pp. 1251-57.
11. Barbero E.J. et al. "Finite Element Modeling of Plain Weave Fabrics From Photomicrograph Measurements," Journal of Composite Structures, Vol. 73, No. 1, 2006, pp. 41-52.
12. Barbero E.J., Lonetti P., and Sikkil K.K. "Finite Element Continuum Damage Modeling of Plain Weave Reinforced Composites" Composites Part B: Engineering, Vol. 37, 2006, pp. 137-47.