

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАМОТКИ ИЗ НЕПРОПИТАННЫХ АРАМИДНЫХ НИТЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЧНОСТИ КОМБИНИРОВАННОГО КОРПУСА ПРИ ОБРЫВЕ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2014 А.Н. Крундаева, Ю.Н. Шмотин, Т.В. Томилина

Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

Предложена конструкция комбинированного корпуса с намоткой из непропитанных арамидных нитей. Основным назначением намотки из непропитанных арамидных нитей является недопущение вылета лопатки за пределы конструкции двигателя. Намотка из непропитанных арамидных нитей – это новое направление в защитных системах самолётных газотурбинных двигателей. Такие системы являются весьма рентабельными (соотношение цена-качество) для решения, например, задачи локализации осколков двигателя при обрыве лопатки, так как нити обладают высокой удельной прочностью на единицу веса. Поэтому внедрение в конструкцию двигателя комбинированного корпуса является весьма перспективным решением. Принцип работы комбинированного корпуса заключается в следующем: лопатка компрессора обрывается и контактирует с соседними лопатками и корпусом, металлическая основа корпуса частично разрушается, фрагмент лопатки взаимодействует через металлическую часть корпуса с намотанными нитками, которые поглощают основную часть энергии удара и удерживают фрагмент лопатки за счёт вытягивания и трения друг о друга. Для предложенного варианта защиты корпуса от вылета лопатки газотурбинного двигателя разработана математическая модель на основе расчётного комплекса LS-DYNA. Созданная модель верифицирована по результатам натурных экспериментов и используется при расчёте на удержание корпусом оборвавшейся лопатки газотурбинного двигателя.

*Непропитанные арамидные нити, намотка, комбинированный корпус, компрессор, математическая модель, ленты.*

Вероятность разрушения роторов авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) относительно мала по сравнению с вероятностью других отказов. Однако проблемы, связанные с этими разрушениями, заставляют проектировать корпуса с учётом локализации вылетов обломков за пределы двигателя.

Для решения проблемы повышения надёжности и снижения массы корпуса ГТД предложен вариант использования намотки из непропитанных полимерных арамидных нитей в конструкции корпуса.

Основным назначением намотки из непропитанных арамидных нитей является недопущение вылета лопатки за пределы конструкции двигателя [1].

Намотка из непропитанных арамидных нитей – это новое направление в защитных системах самолётных газотурбинных двигателей. Такие системы являются весьма рентабельными (соотношение цена-качество) для решения, напри-

мер, задачи локализации осколков двигателя при обрыве лопатки, т.к. нити обладают высокой удельной прочностью на единицу веса. Поэтому внедрение в конструкцию двигателя комбинированного корпуса является весьма перспективным.

Преимущества применения комбинированного корпуса с намоткой из непропитанных арамидных нитей (корпуса с мягкой стенкой) перед цельнометаллическим корпусом для решения проблемы удержания оборвавшейся лопатки ГТД очевидны. Податливость материала корпуса с мягкой стенкой позволяет:

- предотвратить локальный характер разрушения;
- вовлечь больший объём материала корпуса в сопротивление удару;
- обеспечить благоприятное условие воздействия лопатки на корпус.

Комбинированный корпус представляет из себя двухслойную конструкцию: металлическую основу и слой непропи-

таных арамидных нитей (рис. 1). Основу комбинированного корпуса вентилятора составляет материал, обладающий высокой жёсткостью. Предназначение данного слоя: описать форму проточной части вентилятора и увеличить площадь контакта оборвавшейся части лопатки со слоем материала. Второй слой бронезащиты изготавливается из материала с высокими демпфирующими и энергопоглощающими характеристиками. Его предназначение состоит в том, чтобы поглотить энергию оборвавшихся фрагментов лопатки.

В результате проведённого анализа зарубежных [2] и отечественных материалов [3] решено сделать энергопоглощающий слой из непропитанных арамидных нитей типа Руслан – Н, а металлическую основу из хорошо изученного титанового сплава ВТ-6.



Рис. 1. Продольный разрез комбинированного корпуса

Принцип работы комбинированного корпуса заключается в следующем. Лопатка компрессора обрывается и контактирует с соседними лопатками и корпусом. Металлическая основа корпуса частично разрушается. Фрагмент лопатки взаимодействует через металлическую часть корпуса с намотанными нитками, которые поглощают основную часть энергии удара и удерживают фрагмент лопатки за счёт вытягивания и трения друг о друга.

#### Разработка модели намотки

На основе экспериментальных данных с учётом законов поведения изотропных неоднородных материалов для анализа удерживающей способности комбинированных корпусов и максимального использования указанных преимуществ материалов в составе такого корпуса разработан новый подход моделирования намотки из непропитанных арамидных ни-

тей. Создана модель из лент, которая описывает механизм поведения пучков нитей, учитывает её дискретность и неоднородность.

Нити намотки моделируются в виде спирально навитой ленты с заданной шириной и толщиной (рис. 2). Лента наматывается на металлическую основу корпуса. В каждом из слоёв намотки по ширине намоточной части имитатора корпуса укладывается несколько витков ленты, моделирующей совокупность нитей. Для создания геометрии намотки разработан макрос, позволяющий строить намотку в виде лент с различными параметрами: ширина ленты, смещение между витками, число витков, число элементов на один виток намотки и др.

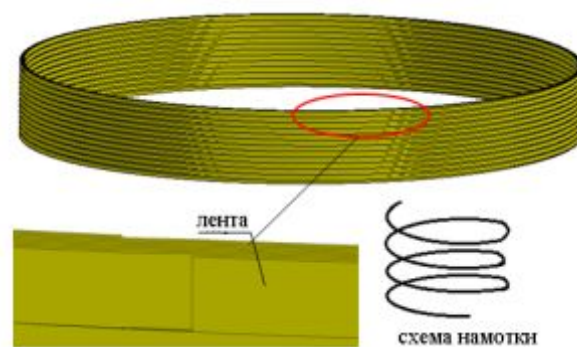


Рис. 2. Модель намотки

Деформирование лент описывается на основе диаграмм деформирования, полученных в результате испытаний образцов нитей. Во время проведения расчётов учитывается разрушение ленты при достижении максимальной главной деформацией  $\epsilon_1$  величины относительного удлинения нити на разрыв  $\delta$ . Расчёт динамического нагружения модели намотки проводится в программном продукте LS-DYNA.

Для описания поведения лент непропитанных арамидных нитей используется модель материала \*MAT\_PLASTICITY\_COMPRESSION\_TENSION. Это изотропный упругопластический материал, в котором можно задавать разные значения предела текучести для сжатия и растяжения в зависимости от пластической деформации. Также может быть учтено разрушение (на основе пла-

стической деформации или минимального размера шага по времени). Эффект скорости деформации учитывается моделью влияния скорости деформации Купера-Саймондса.

Ленты намотки моделируются shell элементами с опцией формулировки мембранного элемента Бельчико-Цая [4]. Толщина shell элемента подбиралась при верификации расчётов. Контроль искажения формы элементов основывается на формулировке Фланаган-Бельчико, а также контролируется введением в расчёт дополнительных точек интегрирования в shell элементы.

#### Установка для верификации разработанной модели

Из-за высокой стоимости экспериментов с применением комбинированного корпуса на двигателе было принято решение на начальном этапе создать стенд (рис. 3).

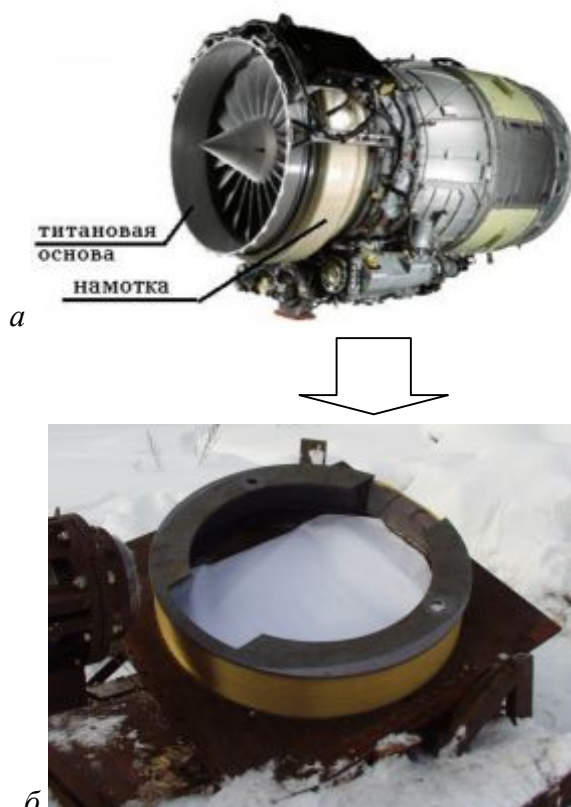


Рис. 3. Замена комбинированного корпуса имитатором:  
а) двигатель с комбинированным корпусом;  
б) испытательный стенд с имитатором комбинированного корпуса

Для определения характера взаимодействия имитатора лопатки вентилятора с арамидными нитями сделана модель комбинированного корпуса с отверстием в металлической основе имитатора, на которую в дальнейшем наматывались непропитанные арамидные нити.

Поражающий элемент (фрагмент) разрушившегося компрессора представляет прямоугольную пластину.

Во время проведения всех экспериментов осуществлялась видеосъёмка скоростной видеокамерой процесса соударения ударника и имитатора бронезащиты, контроль скорости полёта ударника и контроль запреградной скорости ударника.

#### Верификация расчётов по результатам экспериментов

Создана конечно-элементная модель имитатора корпуса, поверх которой выполнена намотка из непропитанных арамидных нитей для двух вариантов намотки: 8 мм и 16 мм.

Все нагрузки и ограничения максимально приближены к условиям на двигателе. Скорость полёта 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 распределённого векторного поля скорости ударника в направлении имитатора корпуса.

В качестве граничных условий используется жёсткое закрепление имитатора корпуса по отверстиям под винты крепления в его нижнем фланце. Результаты расчёта намотки толщиной 8 мм представлены на рис. 4.

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.

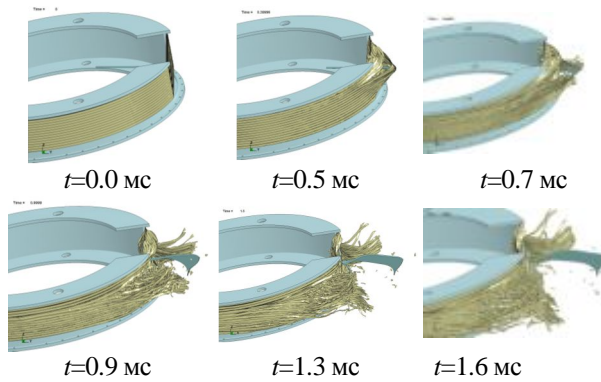


Рис. 4. Взаимодействие ударника и намотки, 8мм

Остаточная скорость ударника после пробития намотки составляет 55 м/с. Значение остаточной кинетической энергии ударника определяется величиной 4.9 кДж, что составляет 7.9% её начального значения.

Результаты расчёта намотки в 16 мм представлены на рис. 5. Анализ полученных результатов показывает, что ударник пробивает лишь часть непропитанной арамидной намотки. Нити, расположенные с краёв 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% её начального значения.

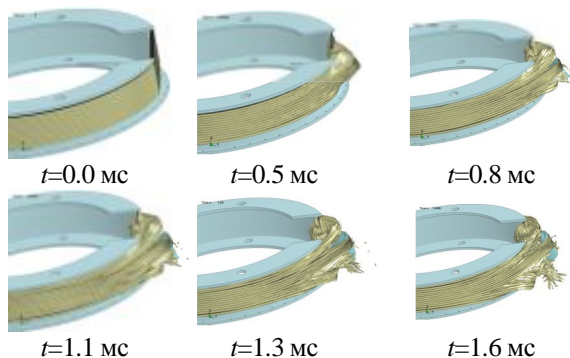
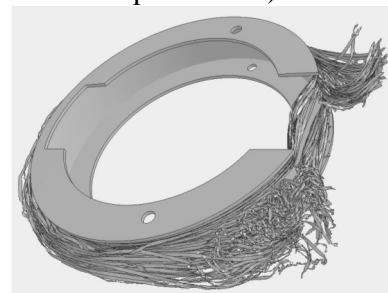


Рис. 5. Взаимодействие ударника и намотки, 16мм

Верификация результатов расчёта проводилась по натурным экспериментам с использованием высокоскоростной камеры.

Верификация результатов расчёта и экспериментов производилась по величине запреградной скорости ударника и по деформации ударника после взаимодействия с намоткой.

Сравнительный анализ результатов расчётов и экспериментов показывает, что разработанная расчётная 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 рис. 6 показано расчётное и полученное в первом эксперименте конечные состояния защитной намотки (толщина намотки из непропитанных арамидных нитей равна 8 мм, по результатам эксперимента намотка не удержала имитатор лопатки).



а



б

Рис. 6. Расчётное и экспериментальное конечное состояние намотки,  $t=2$  мс  
а) расчёт, б) результаты эксперимента

Сравнительный анализ конечных состояний показывает, что расчётная и экспериментальная картины непротиворечивы и относительно близки друг к другу. Видно, что в расчёте и в эксперименте намотка значительно сильнее размахрилась с правой стороны конструкции. Также можно отметить, что в расчёте и в экс-

перименте верхняя и нижняя трети ширины намотки сохранили прочность, а средняя часть разрушилась, что привело к вылету ударника.

На рис. 7 показаны расчётное и полученное во втором эксперименте конечное состояние защитной намотки (толщина намотки из непропитанных арамидных нитей равна 16 мм, по результатам эксперимента намотка удержала имитатор лопатки). Сравнение расчётного и экспериментального промежуточных состояний намотки показывает, что в расчёте, 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 рис. 7 показывает, что во втором эксперименте намотка заметно менее размахрилась, чем в первом. Сравнение конечных состояний показывает, что расчётное и экспериментальное состояния непротиворечивы. Отметим, что и по результатам расчёта для 12 мм намотка размахрилась меньше, чем для 8 мм.

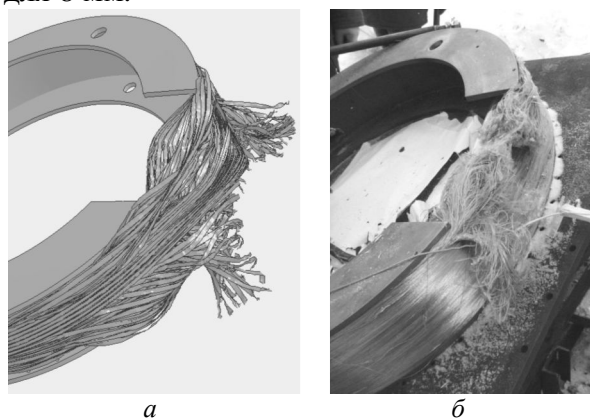


Рис. 7. Расчётное и экспериментальное конечное состояние намотки,  $t=2$  мс  
а) расчёт, б) результаты эксперимента

Как показывают расчёты и эксперименты для исключения перерезания ниток необходимо добавить металлическую основу корпуса.

На заключительном этапе работы проведён расчёт комбинированного корпуса по верифицированной модели в составе двигателя. Как показали результаты, комбинированный корпус с намоткой в 8 мм удерживает оборвавшуюся лопатку вентилятора.

Решение задачи динамического деформирования комбинированного корпуса при соударении с вылетевшей лопаткой проводилось на основе лицензионных программных средств LS-DYNA [4].

### Результаты

Разработана модель намотки из непропитанных арамидных нитей для решения задачи локализации фрагментов оборвавшейся лопатки компрессора. В ходе проведённых работ получена модель комбинированного корпуса с бронезащитой из непропитанных арамидных нитей. При сравнении цельнометаллического и спроектированного комбинированного корпусов, средний диаметр которых равен 966 мм с учётом сохранения требований по удержанию лопатки получили, что выигрыш по массе составил 24% (табл. 1).

Таблица 1 - Сравнение корпусов по массе

	Цельнометаллический	Комбинированный
Масса металла, кг	19,0	12,4
Масса намотки, кг	—	2 кг
Суммарная масса, кг	19,0	14,4

### Библиографический список

1. Авиационные правила. Ч. 33. Нормы лётной годности двигателей воздушных судов. М.: Авиаиздат, 2010. 44 с.
2. 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: Ap-

- plied Science and Manufacturing. 1998. V. 29, no. 11. P. 1411-15.
3. Перепёлкин К.Е. Структура и свойства волокон. М.: Химия, 1985. 324 с.
4. Программный комплекс трёхмерного моделирования процессов нестационарного нелинейного деформирования LS-



### **Информация об авторах**

**Крундаева Анастасия Николаевна**, инженер-конструктор второй категории, Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск. E-mail: [anastas\\_siy@mail.ru](mailto:anastas_siy@mail.ru). Область научных интересов: быстрая динамика, численное моделирование, прочность.

**Шмотин Юрий Николаевич**, кандидат технических наук, генеральный конструктор, ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск. E-mail: [\[saturn.ru\]\(http://saturn.ru\). Область научных интересов: проектирование авиационных двигателей, численное моделирование.](mailto:yuri.shmotin@npo-</a></p></div><div data-bbox=)

**Томилина Татьяна Викторовна**, кандидат технических наук, заместитель начальника ОКБ-1 по науке, Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск. E-mail: [tatyana.tomilina@npo-saturn.ru](mailto:tatyana.tomilina@npo-saturn.ru). Область научных интересов: проектирование авиационных двигателей, численное моделирование.

## **DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF WINDING MADE OF NON-IMPREGNATED ARAMID FIBERS FOR STRENGTH ANALYSIS OF THE COMBINED FAN CASE IN GTE COMPRESSOR BLADE SEPARATION**

© 2014 A.N. Krundaeva, Yu.N. Shmotin, T.V. Tomilina

Joint-Stock Company “NPO Saturn”, Rybinsk, Russian Federation

The design of a combined case with wound non-impregnation aramid fibers is presented. The main purpose of winding non-impregnation aramid fibers is to prevent the departure of the blade beyond the design of the engine. Wound non-impregnation aramid fibers - a new trend in security systems for aircraft gas turbine engines. Such systems are very cost-effective (value for money) to solve, for example, the problem of localization of the fragments of the engine when the blade is broken, since the threads have high specific strength per unit of weight. In this regard, the introduction of engine design combined body is a very promising solution. The principle of operation of a combined case is as follows: compressor blade breaks into contact with the adjacent blades and the housing. Metal case partially destroyed. Fragment blade engages through a metal casing with a thread wound to absorb the main part of the impact energy and keep the blade fragment to the drawing and friction with each other. For the proposed options to protect the body from Flight of the blade turbine engine developed a mathematical model based on the design of the complex LS-DYNA. The created model is verified by the results of field experiments and used to calculate the retention case cut short blades of a gas turbine engine.

*Non-impregnated aramid fibers, winding, combined case, compressor, mathematical model, tape.*

### **References**

1. Aviation Regulations. Part 33 Standards of airworthiness of aircraft engines. Moscow: Aviaizdat Publ., 2010. 44 p. (In Russ.)
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. V. 29, no. 11. P. 1411-1415.
3. Perepelkin K.E. Struktura i svoystva volokon [Structure and properties of the fibers]. Moscow: Khimiya Publ., 1985. 324 p.
4. Program complex three-dimensional modeling of non-stationary processes of non-linear deformation of LS-DYNA. Version 971. Revision 7600.398 // LSTC, Livermore, Ca, USA, 2009.

### **About the authors**

**Krundaeva Anastasia Nikolaevna**, Design Engineer 2 categories of Joint-Stock Company “NPO Saturn”. E-mail: [anastas\\_siy@mail.ru](mailto:anastas_siy@mail.ru). Area of Research: the fast dynamics, numerical modeling, strength.

**Shmotin Yuri Nikolaevich**, Candidate of Science (Engineering), Chief Designer of Joint-Stock Company “NPO Saturn”, Rybinsk. E-mail: [\[saturn.ru\]\(http://saturn.ru\). Area of Research: design aircraft engines, numerical modeling.](mailto:yuri.shmotin@npo-</a></p></div><div data-bbox=)

**Tomilina Tatiana Viktorovna**, Candidate of Science (Engineering), deputy chief of Experimental Design Bureau -1 for Science in Joint-Stock Company “NPO Saturn”. E-mail: [tatyana.tomilina@npo-saturn.ru](mailto:tatyana.tomilina@npo-saturn.ru). Area of Research: design aircraft engines, numerical modeling.