



Конструкторско-технологическое проектирование деталей из слоистого тканевого композита

© 2022, А.А. Павлов

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

Аннотация

Рассматриваются особенности решения задачи проектирования деталей сложной формы из слоистых тканевых композитов в триаде «материал-технология-конструкция». На основе разработанных моделей проектная задача формулируется в терминах нелинейного математического программирования. Новым является подход к выбору основных проектных переменных путём разбиения цифровой модели изделия на конструктивно-технологические группы, которые обеспечивают быстрый и наглядный поиск рациональной структуры и распределения материала в конструкции с использованием генетического алгоритма оптимизации. Предлагаемый подход является развитием методики «точного проектирования» и обеспечивает технологическую осуществимость композитных конструкций слоистой структуры и их высокую весовую отдачу с минимальными доработками на завершающих стадиях проектирования. Применение методики показано на примере решения задачи проектирования композиционного кронштейна навески интерцептора пассажирского самолёта. Сравнение спроектированного кронштейна из слоистого тканевого композита с металлическим аналогом показало значительное снижение массы кронштейна.

Ключевые слова: проектирование, конструкция, слоистый тканевый композит, углепластик, цифровая модель, конструктивно-технологическая группа, оптимизация, генетический алгоритм.

Цитирование: Павлов А.А. Конструкторско-технологическое проектирование деталей из слоистого тканевого композита // Онтология проектирования. 2022. Т.12, №3(45). С.393-404. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-3-393-404.

Благодарности: автор выражает признательность научному руководителю профессору Комарову В.А. и членам редколлегии журнала «Онтология проектирования» за замечания и рекомендации по усовершенствованию данной статьи.

Финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию в части «Разработка методики прогнозирования и повышения несущей способности аэрокосмических конструкций из слоистых композитов с учётом физической нелинейности материала» (проект FSSS-2020-0016).

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В последние десятилетия более 80% инновационных разработок в сфере авиационной техники базируется на внедрении новых конструкционных материалов и технологий их производства [1, 2]. Использование современных высокопрочных композиционных материалов позволяет обеспечить высокие функциональные характеристики и весовую эффективность авиационных конструкций, снизить материалоёмкость, продолжительность создания и стоимость жизненного цикла изделий [3].

В настоящее время доля слоистых композиционных материалов в силовых конструкциях планера современных пассажирских самолётов достигает 50% и с каждым годом увеличивается [4, 5]. Однако сфера применения слоистых композитов, армированных непрерывными волокнами, пока ещё ограничена тонкостенными несущими конструкциями. Данный класс

конструкций воспринимает, в основном, распределённые аэродинамические силы. При этом в авиационной технике присутствует класс деталей (кронштейны, фитинги и др.), воспринимающие сосредоточенные усилия, в которых анизотропные свойства слоистых композитов, как правило, реализуются не в полной мере. Подобные пространственно-нагруженные детали сложной формы представляют интерес с позиций развития методов проектирования композитных конструкций и являются объектом исследования в данной статье.

Общей проблемой для композитных изделий является необходимость проектировать одновременно конструкцию, структуру материала и технологию изготовления. При проектировании композитных конструкций термин «структура» используется в двух понятийных ситуациях – при выборе элементов силовой схемы [6] и описании параметров слоистого композита (типа, количества и направления укладки слоёв армирующего материала) [7].

В традиционном подходе к проектированию авиационных конструкций, в том числе композиционных, технологическая проработка изделия осуществляется после этапа выбора силовой схемы [8]. Технология производства композитных деталей может оказывать существенное влияние на выбор элементов силовой схемы конструкции и, как следствие, требовать её доработки с уточнением взаимосвязанных параметров и последующего внесения конструктивных и технологических изменений.

Активное внедрение цифровизации различных видов инженерной деятельности позволило существенно сократить время разработки изделий – от идеи до практической реализации. В статье «Точное проектирование» [9] описано перспективное направление развития методов проектирования на основе использования высокоточного моделирования и элементов оптимизации на ранних стадиях разработки конструкций. В контексте разработки композитных конструкций данная проектная парадигма позволяет заменить обширные экспериментальные исследования, провести которые не всегда представляется возможным и целесообразным, на использование последовательности цифровых математических моделей, существенно сократив сроки разработки изделий.

В зарубежной практике для проектирования композитных конструкций активно используется методика проектирования, называемая «*Building Block Approach (BBA)*» [10]. Концепция *BBA* предусматривает использование экспериментальных данных и подробных математических моделей на различных стадиях проектирования. Данный подход обеспечивает формирование требуемого объёма сведений об используемом материале для обоснования уровня безопасности силовых элементов, выполненных из композиционных материалов.

Рассматриваемые концепции цифрового проектирования обеспечивают возможность адекватного прогнозирования поведения композитных конструкций на конечных этапах производства и в эксплуатации, существенно сократив затраты времени и средств на испытания и доводки [9].

Одной из ключевых задач проектирования силовых композитных конструкций является учёт технологических особенностей создания изделий со слоистой структурой. В связи с этим актуальной задачей является разработка подхода к выбору из множества проектных переменных наиболее значимых, которые обеспечивают технологическую осуществимость конструкции минимальной массы.

Цель данной статьи – показать практическое применение методики «точного проектирования» конструкций сложной формы из слоистых тканевых композитов.

1 Постановка проектной задачи

Задача проектирования формулируется следующим образом: *необходимо спроектировать конструкцию детали минимальной массы, которая удовлетворяет требованиям проч-*

ности при действии расчётной нагрузки и может быть технологически осуществима из слоистых композиционных материалов.

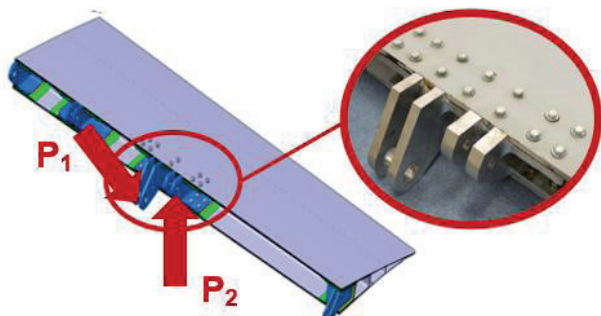


Рисунок 1 – Центральный кронштейн навески композитного интерцептора

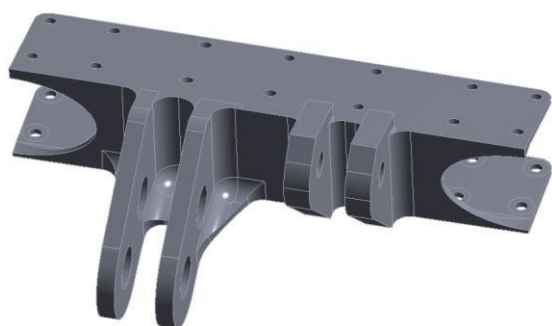


Рисунок 2 – Конструкция металлического кронштейна навески интерцептора

Не снижая методологической общности подхода, можно рассмотреть задачу проектирования композитного кронштейна навески интерцептора современного пассажирского самолёта (см. рисунок 1). Особенность рассматриваемого кронштейна навески состоит в том, что основные сосредоточенные силы, действующие на него, не лежат в одной плоскости.

Разработка рациональной конструкции металлического кронштейна навески интерцептора (см. рисунок 2) проводилась в 2011 г. на кафедре конструкции и проектирования летательных аппаратов Самарского государственного аэрокосмического университета под руководством профессора В.А. Комарова [11]. Конструктивно-силовая схема (КСС) металлической детали была получена с использованием метода тела переменной плотности [12]. Масса спроектированного кронштейна из высокопрочного сплава В95 составила 1200 г. Данное техническое решение было получено с применением современных технологий проектирования, обладает высокой весовой эффективностью и использовалось в данной работе как эталон для композитной конструкции.

В терминах нелинейного математического программирования задача оптимального проектирования композитного кронштейна может быть записана следующим образом: необходимо определить вектор X^* , при котором целевая функция

$$f(X^*) \leq f(X) \forall X \in \Omega, \quad (1)$$

где $\Omega = \{X : g_j(X) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m\}$ – область допустимых проектов;

$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i\}^T$ – вектор проектных переменных $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i$,

$g_j(X)$ – функциональные ограничения.

Критерий оптимальности в рассматриваемой задаче – масса конструкции кронштейна.

В отличие от проектирования конструкций из однородных материалов при переходе на слоистые композиты необходимо выбрать способ описания КСС конструкции с учётом возможности технологии её изготовления. Для решения этой задачи *проектные переменные* разделены на два блока параметров: *геометрические*, которые определяют КСС, и *структурные*, которые определяют внутреннюю структуру композиционного материала. В случае слоистых тканевых композитов структурные проектные переменные учитывают количество и направление укладки слоёв ткани и являются дискретными, диапазон изменения которых задаётся в виде ограничений:

$$a \leq x_i \leq b, \quad (2)$$

где a и b – минимальные и максимальные значения проектных переменных.

Функциональные ограничения определяют область допустимых проектов. В инженерной практике для слоистых композитов в качестве функциональных ограничений используются безразмерные критерии прочности [13, 14] в виде неравенств

$$\varphi(\sigma, [\sigma]) \leq 1, \quad (3)$$

где $\varphi(\sigma, [\sigma])$ – функция компонент тензора напряжений σ и соответствующего набора их допускаемых значений $[\sigma]$. Считается, что конструкция не разрушается, если условие (3) выполняется в каждом её элементе.

В данной работе в качестве функционального ограничения рассматривается распространённый критерий максимальных напряжений, который прост и нагляден, так как каждая составляющая отвечает за восприятие «своего» напряжения, что позволяет предсказать не только разрушающую нагрузку, но и форму разрушения.

2 Конструкторско-технологическое проектирование

При постановке задачи оптимального проектирования композитной конструкции для имеющейся КСС важным этапом является выбор проектных переменных. Основная сложность данного этапа заключается в том, что параметры слоистой структуры необходимо связать с элементами КСС. При использовании традиционных подходов к проектированию привязка структурных параметров осуществляется непосредственно к поверхностям геометрической модели, т.е. путём «наращивания» материала. В этом случае композитная конструкция может быть технологически неосуществима из-за несовместности силовой работы контактирующих групп слоёв на сопрягаемых поверхностях. В связи с этим возникает необходимость в адаптации геометрической модели конструкции к особенностям производства изделий из слоистых композитов.

С этой целью проводится анализ поверхностной геометрической модели КСС, которая разбивается на ряд конструктивно-технологических групп (КТГ).

Поверхностная геометрическая модель детали представляет собой совокупность базовых поверхностей, формирующих её будущий облик. Для описания геометрической модели используется граничное представление описания геометрической формы [15]. Для обеспечения простоты технологической реализации композитной конструкции предпочтительнее использовать поверхности одинарной кривизны с использованием угловых и тавровых соединений.

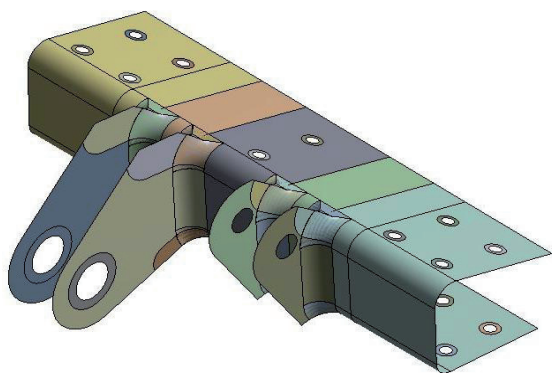


Рисунок 3 – Поверхностная геометрическая модель описания силовой схемы конструкции

В рассматриваемом примере геометрическую модель кронштейна навески интерцептора рациональной КСС целесообразно представить в виде двух базовых поверхностей (верхней и нижней полок) с отверстиями под крепёжные элементы, четырёх поверхностей проушин с отверстиями под нагружающие элементы и вертикальной (передней) опорной стенки (см. рисунок 3). Опорные поверхности, на которых располагаются крепёжные элементы, являются плоскими. Плоскости проушин перпендикулярны передней стенке. Такую пространственную модель можно рассматривать как своего рода цифровой аналог теоретического чертежа, принятого в авиастроении [16].

Разработанное цифровое представление силовой схемы конструкции позволяет сформировать КТГ путём объединения сопрягаемых поверхностей геометрической модели в от-

дельные элементы КСС. При этом разбиение модели на КТГ выполнено в соответствии с типом используемых армирующих материалов и связующего, а также конгруэнтности формы развёртки элементов группы. Схема декомпозиции изделия на КТГ должна обеспечивать как совместность силовой работы контактирующих групп, так и возможность пошаговой сборки на этапе изготовления.

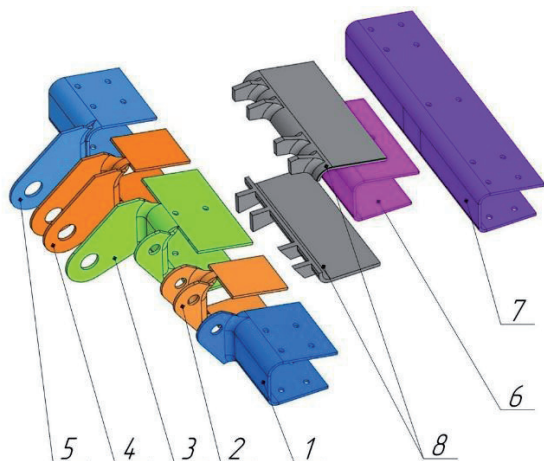


Рисунок 4 – Схема разбиения кронштейна навески интерцептора на КТГ

По результатам анализа КСС проектируемого кронштейна согласно изложенным принципам выделены 8 КТГ (см. рисунок 4), последовательная выкладка которых в технологическую оснастку позволяет получить интегральную композитную конструкцию, эффективно воспринимающую действующие нагрузки [17].

КТГ1-КТГ5 включают в себя поверхности проушин, передней стенки, а также верхней и нижней полок. Данный способ разбиения обеспечивает неразрывность волокон армирующего материала на пути потоков усилий от точки приложения нагрузки в проушинах до точек крепления на полках. КТГ6-КТГ7 включают в себя переднюю стенку и полки. Материал

КТГ1-КТГ7 – ортотропный тканевый углепластик CC201/SR8100-SD8824. КТГ 8 представляет собой элементы усиления зоны радиального перехода между проушинами, передней стенкой и верхней/нижней полками. В качестве материала КТГ8 использована однонаправленная углеродная лента ЛУ-П/01. Выкладка слоёв КТГ8 осуществлялась послойно с чередованием слоёв КТГ1-КТГ5. Все КТГ имеют сгибы одинарной кривизны, позволяющие произвести развёртку групп на плоскости ткани без искажения и деформации армирующих нитей. В дальнейшем это обеспечивает соответствие структуры материала реального изделия структуре, заложенной в модели.

3 Поиск рационального распределения материала

В соответствии с предлагаемым подходом структурные проектные переменные назначаются для каждой из сформированных КТГ. В качестве параметров могут выступать количество, тип и направление укладки пакета слоёв (однородная, ортогональная, перекрёстная, квазиизотропная), которые определяют технологическую осуществимость разрабатываемого изделия.

В композитных конструкциях наиболее часто используются квазиизотропная и ортотропная структуры укладки слоёв [18]. В случае использования сложных комбинаций упаковок вводятся дополнительные проектные переменные – угол ориентации и количество слоёв для составляющих комбинаций.

Для проектируемого композитного кронштейна схему армирования целесообразно подбирать на основе анализа картины распределения векторов главных напряжений в изотропной модели. Данное допущение вводится с целью упрощения процесса моделирования, но при этом даёт существенную информацию для выбора направления укладки армирующего материала слоистой конструкции.

На основе анализа картины распределения векторов главных напряжений рассматриваемого кронштейна (см. рисунок 5) сделан вывод о целесообразности использования в основном квазиизотропной структуры укладки слоёв.

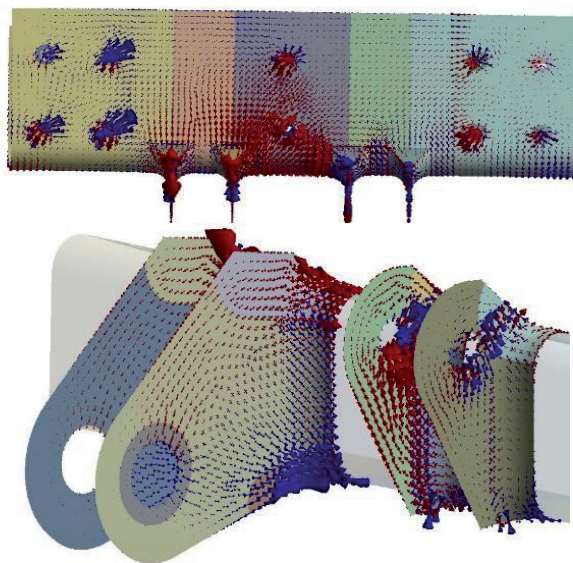


Рисунок 5 – Направления главных усилий в изотропной конструкции

В качестве основного конструкционного материала рассматривается слоистый углепластик CC201/SR8100-SD8824 на основе биаксиальной углеродной ткани полотняного плетения CC201 и двухкомпонентного эпоксидного связующего SR8100/SD8824. Для изготовления кронштейна использована технология RTM-формования. Свойства слоистого углепластика определялись экспериментально в лаборатории композиционных материалов и конструкций Самарского университета [19].

Предлагаемая схема разбиения композитных конструкций сложной формы на КТГ позволяет выделить из множества проектных переменных наиболее значимые. В данной работе в качестве основных задавались только структурные проектные переменные – количество слоёв с заданной

структурой армирования в каждой из КТГ.

В таблице 1 приведены проектные переменные и геометрические ограничения (2) на них в дискретной форме, т.е. определена область поиска. Выбранный вектор проектных переменных позволяет сформировать конечно-элементную модель (КЭМ) кронштейна со слоистой структурой со свойствами композиционного материала (см. рисунок 6).

Таблица 1 – Геометрические ограничения на проектные переменные

Проектная переменная	Наименование	Единица измерения	Шаг, Δx_i	Нижний предел, a	Верхний предел, b	Направление армирования
x_1	Количество слоёв в КТГ1	шт.	2	6	24	45
x_2	Количество слоёв в КТГ2	шт.	2	6	24	0
x_3	Количество слоёв в КТГ3	шт.	2	6	24	45
x_4	Количество слоёв в КТГ4	шт.	2	6	24	0
x_5	Количество слоёв в КТГ5	шт.	2	6	24	45
x_6	Количество слоёв в КТГ6	шт.	2	4	14	45
x_7	Количество слоёв в КТГ7	шт.	2	4	14	0
x_8	Количество слоёв в КТГ8	шт.	2	2	20	0

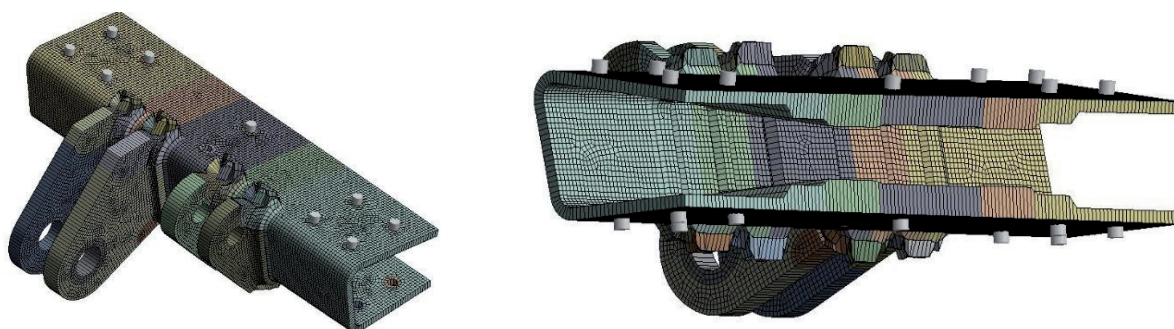
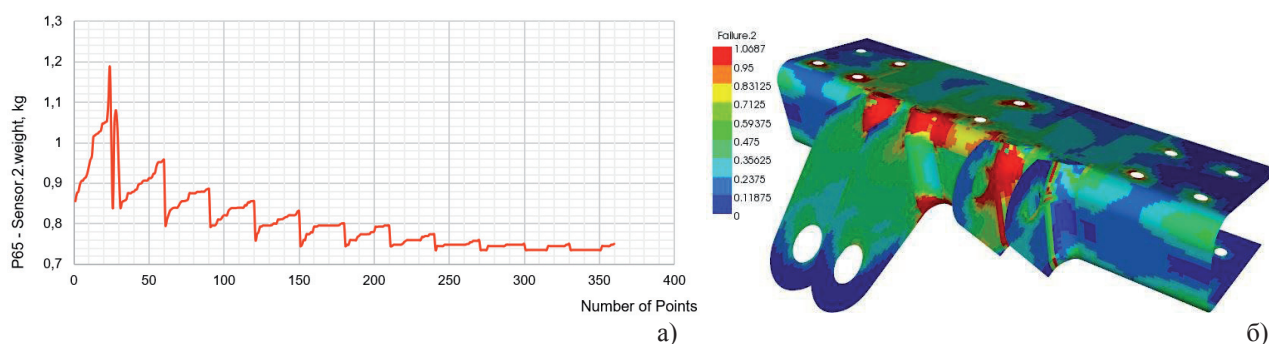


Рисунок 6 – Конечно-элементная модель со слоистой структурой (для наглядности визуализированы толщины элементов)

Особенностью данной 3D-модели является последовательность укладки слоёв, которая обеспечивает возможность технологической реализации композитной конструкции. Для рассматриваемого кронштейна построение КЭМ со слоистой структурой осуществлялось в специализированном модуле *ANSYS ACP PrePost*. Наращивание слоёв передней стенки и полок осуществлялось от поверхности теоретического контура конструктивно-технологической модели внутрь конструкции, для проушин – в две стороны от опорной плоскости. При этом выкладка слоёв КТГ1-КТГ5 осуществлялась послойно с чередованием от центра (КТГ3) внахлёт с КТГ2 и КТГ4, а далее внахлёт со слоями КТГ1 и КТГ5 соответственно. Такой последовательный способ укладки слоёв позволяет наиболее эффективно передавать усилия на стыке КТГ.

Поиск рационального распределения материала в конструкции осуществлялся с использованием генетического алгоритма *MOGA (Multi Objective Genetic Algorithm)* [20]. Максимальное число популяций принималось равным 20. Одна популяция состояла из 35 особей. В качестве функциональных ограничений задавалось условие прочности по критерию максимальных напряжений. Критерием окончания оптимизации выступал признак сходимости (должен быть $\leq 2\%$ доли особей, попадающих в область Парето, которая должна быть $\geq 70\%$) [20]. Подбор рационального распределения структурных проектных переменных осуществлялся с использованием среды *ANSYS Direct Optimization*.

В процессе оптимизаций сгенерировано 9 популяций, причём значения массы конструкции (целевой функции) фиксировались на каждой итерации (см. рисунок 7а). Картина распределения прочности показана на рисунке 7б.



а – изменение целевой функции (массы) в процессе оптимизации;

б – картина распределения максимальных напряжений в рациональной композитной конструкции

Рисунок 7 – Результаты оптимизации конструкции кронштейна

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что разработанная конструкция кронштейна навески интерцептора удовлетворяет требованиям прочности во всех элементах конструкции.

Таблица 2 – Рациональные значения проектных переменных в композитном кронштейне

Проектная переменная	Наименование	Единица измерения	Значение
x_1	Количество слоёв в КТГ1	шт.	10
x_2	Количество слоёв в КТГ2	шт.	12
x_3	Количество слоёв в КТГ3	шт.	24
x_4	Количество слоёв в КТГ4	шт.	12
x_5	Количество слоёв в КТГ5	шт.	10
x_6	Количество слоёв в КТГ6	шт.	8
x_7	Количество слоёв в КТГ7	шт.	8
x_8	Количество слоёв в КТГ8	шт.	10

В результате оптимизации получен вектор проектных переменных (см. таблицу 2), который обеспечивают технологическую осуществимость разрабатываемой конструкции.

Полученный вектор рациональных значений проектных переменных определяет цифровую модель кронштейна навески

интерцептора, масса которого составила 751 г. (см. рисунок 8).

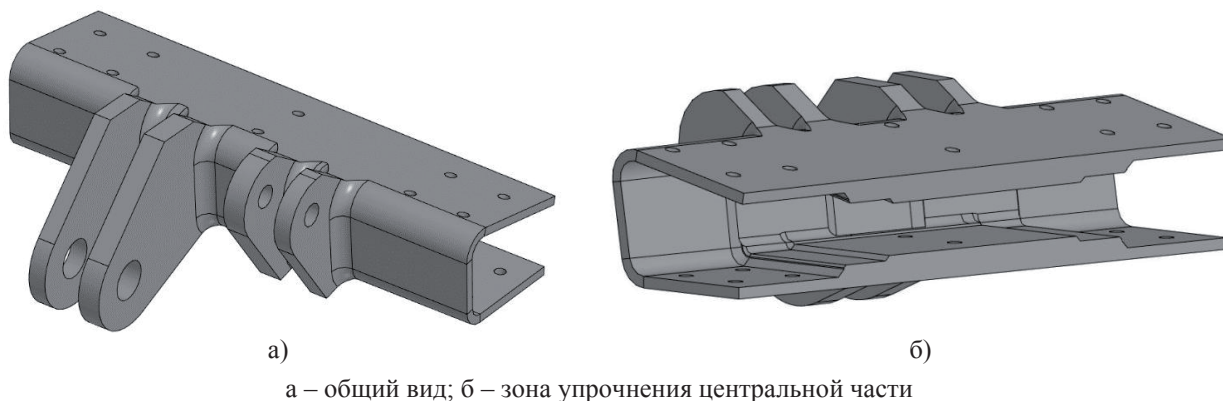


Рисунок 8 – Итоговая 3D-модель кронштейна навески интерцептора

4 Верификация разработанного подхода

Для экспериментальной оценки результатов проектирования композитного кронштейна навески интерцептора изготовлен и испытан опытный образец.

Изготовление композитного кронштейна осуществлялось методом *RTM*-формования. Для обеспечения заданной геометрической формы будущей заготовки использовалась специально разработанная технологическая оснастка (см. рисунок 9). Особенностью данной оснастки является использование разъёмных закладных элементов, которые позволяют обеспечить одновременно точность выполнения геометрических параметров конечного изделия и технологичность работы с заготовкой. Общий вид полученного композитного кронштейна навески интерцептора после механической обработки показан на рисунке 9в.

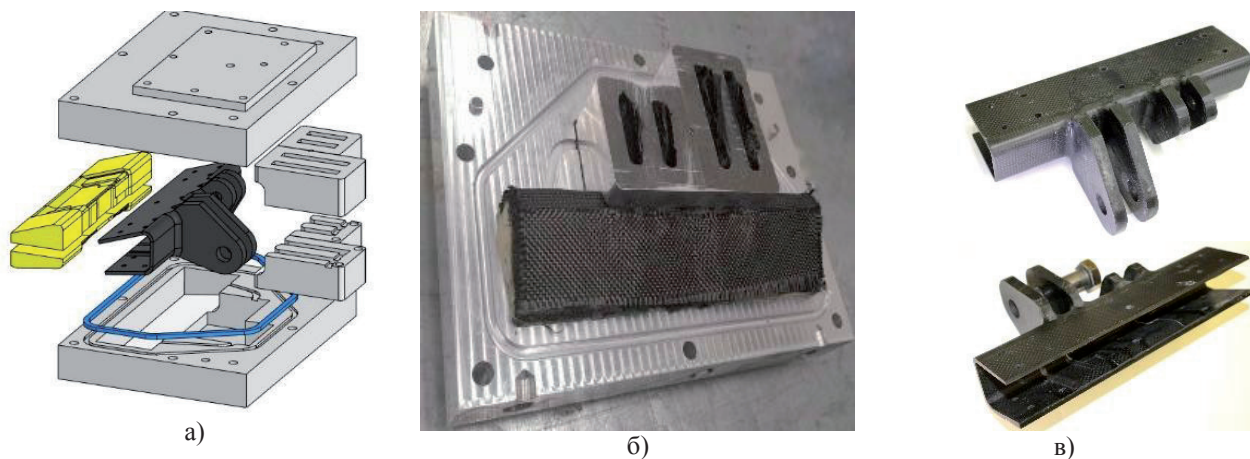
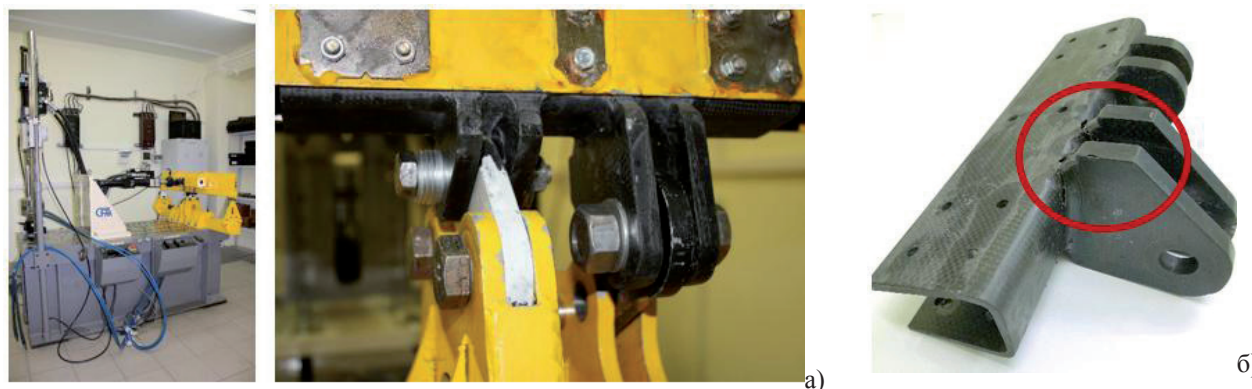


Рисунок 9 – Изготовление композитного кронштейна навески интерцептора

Испытания композитного кронштейна проводились с использованием специальной оснастки¹, имитирующей интерцептор крыла самолёта (см. рисунок 10). Установка кронштейна в испытательную оснастку осуществлялась при помощи болтового соединения. Нагружение кронштейна осуществлялось перемещением гидравлического штока испыта-

¹ Оснастка спроектирована и разработана Чарквиани Р.В. и Чарквиани Г.В. под руководством профессора Комарова В.А. для испытаний металлического кронштейна.

тельной машины. Общий вид композитного кронштейна, установленного в испытательном стенде, показан на рисунке 10а. Нагружение кронштейна в процессе испытаний осуществлялось со скоростью 5 мм/мин до разрушения.



а – испытательная машина и оснастка; б – зона разрушения конструкции

Рисунок 10 – Результаты испытаний опытного образца композитного кронштейна

Результаты испытаний показали, что разрушающее усилие для композитного кронштейна навески составило 11 759 Н, что соответствует 98% расчётной нагрузки. Разрушение кронштейна произошло в зоне радиального стыка проушин активатора и передней стенкой (см. рисунок 10б). Таким образом, результаты испытаний композитного кронштейна навески и характер его разрушения показывают практически полное совпадение с данными математического моделирования. Использование слоистого углепластика позволило снизить массу, по сравнению с исходным металлическим кронштейном навески интерцептора, на 35%.

Заключение

Полученные результаты проектирования, изготовления и испытания композитного кронштейна навески интерцептора показали практическое применение методики «точного проектирования».

Предложенный способ группирования элементов конструкций сложной формы в КТГ позволяет выделить из множества проектных переменных наиболее значимые, которые обеспечивают технологическую осуществимость разрабатываемой конструкции и возможность поиска рационального распределения материала.

Список источников

- [1] **Каблов Е.Н.** России нужны материалы нового поколения. *Редкие земли*. 2014. №3. С.8-13.
- [2] **Дежина И., Пономарев А.** Перспективные производственные технологии: новые акценты в развитии промышленности. Форсайт. М.: ВШЭ, 2014. Т.8, №2. С.16-29.
- [3] **Мэттьюз Ф., Роллингс Р.** Мир материалов и технологий. Композиционные материалы. Механика и технология. М.: Техносфера, 2004. 408 с.
- [4] **Smurov M.Y., Gubenko A.V., Ksenofontova T.Y., Staroselets V.G.** Comparative Analysis of Innovative Materials. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol.12. Issue 3. P.394-401.
- [5] **Савин С.П.** Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т.14, №4(2). С.686-693.
- [6] **Комаров В.А.** Проектирование силовых аддитивных конструкций: теоретические основы. *Онтология проектирования*. 2017. Т.7, №2(24). С.191-206. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-191-206.
- [7] **Vasiliev V.V., Morozov E.V.** Advanced mechanics of composite materials and structural elements. Kidlington, Oxford: Elsevier, 2013. 818 p.

- [8] **Ендогур А.И.** Проектирование авиационных конструкций. Проектирование конструкций деталей и узлов. М.: Изд-во МАИ, 2013. 556 с.
 - [9] **Комаров В.А.** Точное проектирование. *Онтология проектирования*. 2012. №3. С.8–23.
 - [10] **Carello M., Amirth N., Airale A.G., Monti M., Romeo A.** Building Block Approach' for Structural Analysis of Thermoplastic Composite Components for Automotive Applications. *Applied Composite Materials*. 2017. Vol.24 P.1309-1320.
 - [11] **Комаров В.А., Кишов Е.А., Чарквиани Р.В.** Топологическая оптимизация в проектировании высоконагруженных узлов авиационных конструкций. *Общероссийский научно-технический журнал «Полёт»*. 2018, №8. С.16-23.
 - [12] **Komarov V.A., Kishov E.A., Kurkin E.I.** Aircraft Composite Spoiler Fitting Design Using the Variable Density Model. *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 65. P.99-106.
 - [13] **Викарио А., Толанд Р.** Критерии прочности и анализ разрушения конструкций из композиционных материалов. Сборник «Композиционные материалы». М.: Машиностроение. 1978 Т.8. С.62-107.
 - [14] **Баширов Е.А., Ерков А.П.** Метод расчёта многослойного пакета из полимерного композиционного материала с учётом выбора критерия прочности. *Общероссийский научно-технический журнал «Полёт»*. 2018. Т.6. С.39-53.
 - [15] **Голованов Н.Н.** Геометрическое моделирование. М.: Издательство Физико-математической литературы, 2002. 472 с.
 - [16] **Комаров В.А., Кишов Е.А., Лайкова О.Г., Павлов А.А.** Цифровое проектирование терморазмеростабильных конструкций из слоистого углепластика. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2021. Т.20, №2. С.63-70.
 - [17] **Халиулин В.И., Батраков В.В.** Анализ применения инновационных методов для производства интегральных конструкций из композитов. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2016. №3. С.129-133.
 - [18] **Батаев А.А., Батаев В.А.** Композиционные материалы: строение, получение, применение. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 384 с.
 - [19] **Комаров В.А., Павлов А.А., Павлова С.А.** Экспериментально-аналитическое определение упругих характеристик слоистого тканевого композита. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2022. Т.21, №2. С.65-79.
 - [20] **Grebenisan G., Salem N.** The multi-objective genetic algorithm optimization of a superplastic forming process using ANSYS. *MATEC Web of Conferences*, 2017. 35 p.
-

Сведения об авторе



Павлов Александр Александрович, 1992 г. рождения. В 2015 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) по специальности 22.03.05 «Автоматизированное управление жизненным циклом продукции». В 2021 году окончил аспирантуру Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва (Самарский университет) по специальности 05.07.02 «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов». Инженер научно-образовательного центра авиационных конструкций (НОЦ-202) Самарского университета. В списке научных трудов более 20 работ в области проектирования и оптимизации композитных конструкций. alex-alex.pavlov@yandex.ru.

Поступила в редакцию 29.08.2022, после рецензирования 5.09.2022. Принята к публикации 11.09.2022.



Technological design of parts using layered fabric composite

© 2022, A.A. Pavlov

Samara University (Samara National Research University named after academician S.P. Korolev), Samara, Russia

Abstract

The article considers the features of solving the problem of designing complex shape constructions made from layered fabric composites considering the triad "material-technology-construction". Based on the developed models, the design problem is formulated in terms of non-linear mathematical programming. The novelty is the approach to choosing the main design variables by dividing the digital model of the product into structural and technological groups, which provide a quick and visual search for a rational distribution of material in the structure using a genetic optimization algorithm. The proposed approach is a development of the "precision design" methodology. It ensures the technological feasibility of composite items with a layered structure and their high weight return with minimal modifications at the early stages of design. The application of the technique is shown on the example of solving the problem of designing a composite bracket for the spoiler hinge of a modern passenger aircraft. Comparison of the designed bracket made of a layered fabric composite with a metal counterpart showed a significant reduction in the weight of the bracket.

Key words: design, construction, layered fabric composite, carbon-fiber reinforced plastic (CFRP), digital model, constructive and technological group, optimization, genetic algorithm.

For citation: Pavlov AA. Technological design of parts using layered fabric composite [In Russian]. *Ontology of design* 2022; 12(3): 393-404. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-3-393-404.

Acknowledgment: The author expresses his gratitude to the scientific adviser Professor Komarov V.A. and the members of the Editorial Board who made comments and recommendations for improving this manual.

Financial Support: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education as part of the work under the State task in the part "Development of a methodology for predicting and increasing the bearing capacity of aerospace structures from layered composites, taking into account the physical nonlinearity of the material" (project FSSS-2020-0016).

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

List of figures and tables

- Figure 1 – Central mounting bracket for composite spoiler
- Figure 2 – Construction of the metal bracket of the spoiler hinge
- Figure 3 – Surface geometric model for describing the load-carrying scheme of a structure
- Figure 4 – Scheme of splitting the spoiler mounting bracket into structural and technological groups
- Figure 5 – Directions of the main stresses flows in an isotropic design
- Figure 6 – Finite element model with layered structure
- Figure 7 – Optimization results
- Figure 8 – Final 3D model of the composite bracket
- Figure 9 – Composite bracket manufacturing process
- Figure 10 – Composite bracket test results
- Table 1 – Geometric Constraints on Design Variables
- Table 2 – Rational distribution of material in the composite bracket

References

- [1] **Kablov EN.** Russia Needs New Generation Materials [In Russian]. *Rare Earths*. 2014; 3: 8-13.
- [2] **Dezhina I, Ponomarev A.** Perspective production technologies: new accents in the development of industry [In Russian]. *Foresight*. 2014; 8(2): 16-29.

- [3] **Matthews F, Rollings R.** World of Materials and Technologies. Composite materials. Mechanics and technology [In Russian]. Moscow: Technosfera, 2004. 408 p.
- [4] **Smurov MY, Gubenko AV, Ksenofontova TY, Staroselets VG.** Comparative Analysis of Innovative Materials. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017; 12(3): 394-401.
- [5] **Savin SP.** The use of modern polymer composite materials in the airframe constructions of the MC-21 family [In Russian]. *Izvestia of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012; 14(4): 686-693.
- [6] **Komarov VA.** Theoretical basis for design of load-bearing structures produced using additive technologies [In Russian]. *Ontology of designing*, 2017; 7(2): 191-206. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-191-206.
- [7] **Vasiliev VV, Morozov EV.** Advanced mechanics of composite materials and structural elements. Kidlington, Oxford: Elsevier, 2013. 818 p.
- [8] **Endogur AI.** Airframe structural design. Design of structures of parts and assemblies [In Russian]. Moscow: MAI Publishing House, 2013. 556 p.
- [9] **Komarov VA.** Concurrent design [In Russian]. *Ontology of designing*. 2012; 3: 8 – 23.
- [10] **Carello M, Amir N, Airale AG, Monti M, Romeo A.** Building Block Approach' for structural analysis of thermoplastic composite components for automotive applications. *Applied Composite Materials*. 2017; 24: 1309-1320.
- [11] **Komarov VA, Kishov EA, Charkviani RV.** Topological optimization in the design of highly loaded units of aircraft structures [In Russian]. All-Russian Scientific and Technical Journal "Flight". 2018; 8: 16-23.
- [12] **Komarov VA, Kishov EA, Kurkin EI.** Aircraft Composite Spoiler Fitting Design Using the Variable Density Model. *Procedia Computer Science*. 2015; 65: 99-106.
- [13] **Vicario A, Toland R.** Strength criteria and failure analysis of structures made of composite materials [In Russian]. Collection "Composite materials". Moscow: Mashinostroenie. 1978. Vol.8. P.62-107.
- [14] **Basharov EA, Erkov AP.** A method for calculating a multilayer package made of a polymer composite material, taking into account the choice of strength criterion [In Russian]. All-Russian Scientific and Technical Journal "Flight". 2018; 6: 39-53.
- [15] **Golovanov NN.** Geometric modeling [In Russian]. Moscow: Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 2002. 472 p.
- [16] **Komarov VA, Kishov EA, Laikova OG, Pavlov AA.** Digital design of heat-resistant dimensionally stable carbon laminate (CFRP) structures [In Russian]. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021; 20(1): 75-86. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-1-75-86.
- [17] **Khaliulin VI, Batrakov VV.** Analysis of the application of innovative methods for the production of integral structures from composites [In Russian]. *Izvestia of higher educational institutions. Aviation technology*. 2016; 3: 129-133.
- [18] **Bataev AA, Bataev VA.** Composite materials: structure, production, application [In Russian]. Novosibirsk: Publishing House of NGTU, 2002. 384 p.
- [19] **Komarov VA, Pavlov AA, Pavlova SA.** Experimental and analytical determination of the elastic characteristics of layered woven composites [In Russian]. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022; 21(2): 65-79. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-65-79.
- [20] **Grebenisan G, Salem N.** The multi-objective genetic algorithm optimization of a superplastic forming process using ANSYS. *MATEC Web of Conferences*, 2017. 35 p.

About the author

Alexander Alexandrovich Pavlov (b. 1992). In 2015, he graduated from the Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University) with a degree in Automated product lifecycle management. In 2021, he completed his postgraduate studies at the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Samara National Research University named after academician S.P. Korolev" (Samara University), with a degree in Design, construction and production of aircraft. Engineer of the Scientific and Educational Center for Aviation Structures (REC-202) of Samara University. The list of scientific papers includes more than 20 works in the field of design and optimization of composite structures. alex-alex.pavlov@yandex.ru.

Received August 29, 2022. Revised September 5, 2022. Accepted September 11, 2022.
