

# Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 629.7.023:539.3

doi: 10.18698/0536-1044-2023-4-62-71

## Исследования синтеза бионических тонкостенных конструкций типа отсека фюзеляжа самолета

Л.П. Железнов, Н.А. Лапердина

ФАУ «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина»

## Research on the synthesis of bionic thin-walled structures of the aircraft fuselage compartment type

L.P. Zheleznov, N.A. Laperdina

Chaplygin Siberian Scientific Research Institute of Aviation

С помощью метода топологической оптимизации выполнен синтез бионических структур отсека перспективного самолета малой авиации, изготовленного из алюминиевого сплава. Топологическая оптимизация проведена на основе метода ESO-SIMP с использованием средств программного обеспечения ANSYS Workbench. Исследовано влияние конструктивных параметров, в частности толщины оболочки, на прочностные и весовые характеристики бионических структур отсека после топологической оптимизации при действии внешних нагрузок.

**Ключевые слова:** топологическая оптимизация, бионические конструкции, устойчивость отсека фюзеляжа, напряженно-деформированное состояние, коэффициент запаса прочности, летательные аппараты

The topological optimization method was used to synthesize bionic structures for the promising small aircraft compartment made of aluminum alloy. Topological optimization was performed on the basis of the ESO-SIMP method using the ANSYS Workbench software tools. Influence of the design parameters, in particular, of the shell thickness, on the strength and weight characteristics of the compartment bionic structures after topological optimization was studied under the external loads action.

**Keywords:** topological optimization, bionic structures, fuselage compartment stability, stress-strain state, factor of assurance, aircraft

К современным летательным аппаратам предъявляют повышенные требования не только по прочности, но и по массе с целью повышения экономической эффективности. Средства проектирования летательного аппарата позволяют не только рассчитать напряженно-деформированное состояние его эле-

ментов, но и оптимизировать конструкцию в соответствии с заданными ограничениями по массе и прочности.

В общем случае определяют модель-заготовку детали, из которой в дальнейшем удаляют лишний материал. Этот метод назван топологической оптимизацией (ТО).

Результатом ТО является достаточно сложная структура (форма), на основе которой формируют модель детали для производства. Такая деталь обладает требуемой прочностью при минимальной массе, но слишком сложна в изготовлении традиционными способами (литьем, фрезерованием и т. д.). В этом случае целесообразно использовать аддитивные технологии.

Современные авиастроительные предприятия заинтересованы в повышении надежности и качества продукции при одновременном снижении ее массы и трудоемкости изготовления. Чтобы отвечать этим требованиям, передовые компании на различных этапах проектирования все чаще используют инструменты оптимизации конструкций и их топологии. Время разработки готового продукта значительно сокращается благодаря созданию оптимальной конструкции, соответствующей заданным эксплуатационным нагрузкам [1].

Информационная совместимость современного программного обеспечения CAD/CAE позволяет легко конвертировать результаты оптимизации топологии в техническую CAD-модель, пригодную для последующего изготовления элементов оптимальной конструкции [2].

Одним из важных направлений развития методов ТО является обмен идеями между биологией и техникой. С одной стороны, технические решения и инструменты позволяют лучше понять принципы работы живых организмов (биомеханика), с другой — природа часто подсказывает инженерам достаточно простые решения стоящих перед ними проблем.

Круг идей, заимствованных инженерами из живой природы, весьма широк. Воплощенные в технические устройства принципы строения живых организмов называют биомиметикой. Особенно ярко выраженное заимствование идей из природы представлено в создании малых беспилотных летательных объектов (Micro Air Vehicles и Unmanned Air Vehicles), предназначенных для слежения за объектами в ограниченном пространстве [3, 4].

В настоящий момент разработано достаточно много численных методов ТО конструкций, таких как Solid Iso-tropic Material with Penalization (SIMP) [5], Level Set [6–8], Evolutionary Structural Optimization (ESO), Bidirectional Evolutionary Structural Optimization [9], Hyper Radial Basis Function Networks [10], Genetic Algorithms [11, 12] и их комбинации.

Указанные методы, различаясь представлением объекта конструирования, набором варьируемых параметров структуры и алгоритмом оптимизации, всегда используют конечно-элементный анализ смещений, деформаций и напряжений, а также тот или иной критерий оптимальности.

Цель работы — синтез бионической структуры отсека фюзеляжа (ОФ) перспективного самолета малой авиации, выполненного из алюминиевого сплава, с использованием метода ESO-SIMP и программного обеспечения ANSYS Workbench.

Исследовано влияние толщины оболочки на прочностные и весовые характеристики бионических структур ОФ после ТО при действии внешних нагрузок.

**Описание метода ТО.** Метод SIMP или метод пенализации для твердого изотропного тела, основан на создании поля так называемой виртуальной плотности, представляющей собой аналог некоторой реальной характеристики объекта ТО.

Этот метод предназначен для уменьшения податливости конструкции вследствие перераспределения материала в исследуемой области пространства при известных граничных условиях и нагрузках. Результатом ТО является получение равнопрочного объекта в рамках рассматриваемой постановки задачи.

В методе ESO-SIMP [13] область проектирования  $\Omega$  разбивают с помощью конечных элементов (КЭ). При этом свойства материала постоянны в каждом КЭ и зависят от относительной плотности  $i$ -го КЭ  $x_i$ . Относительная плотность должна быть равна единице или нулю в расчетной области  $\Omega$  после ТО.

Для ограничения промежуточной относительной плотности используют фактор отбраковки  $p$ . Модуль упругости  $E$  и относительная плотность связаны выражением [13]

$$E(x_i) = E_{\min} + (x_i)^p (E_0 - E_{\min}),$$

где  $E_{\min}$ ,  $E_0$  — модули упругости материала; для численной устойчивости итерационного процесса  $E_{\min} = E_0 / 1000$ .

Относительные плотности КЭ выбраны в качестве расчетных переменных, а среднее соответствие — как целевая функция. Тогда задачу оптимизации топологии для минимального соответствия можно записать в виде

Find :  $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;

$$\begin{aligned} \text{Minimize : } C(\mathbf{X}) &= \mathbf{F}^T \mathbf{U} = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \sum_{i=1}^n \mathbf{u}_i^T \mathbf{k}_i \mathbf{u}_i = \\ &= \sum_{i=1}^n (x_i) \mathbf{u}_i^T \mathbf{k}_{0i} \mathbf{u}_i; \end{aligned}$$

$$\text{Subject to : } \mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{F}; \quad V = \sum_{i=1}^n x_i v_i \leq f_0 V_0;$$

$$0 < x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \leq 1,$$

где  $\mathbf{X}$  — вектор относительных плотностей КЭ;  $C$  — целевая функция, определяемая как среднее соответствие;  $\mathbf{F}$  — вектор внешней нагрузки;  $\mathbf{U}$  — вектор узловых перемещений;  $\mathbf{K}$  — глобальная матрица жесткости;  $\mathbf{k}_i$  — матрица жесткости отдельного КЭ после интерполяции плотности;  $\mathbf{k}_{0i}$  и  $\mathbf{u}_i$  — матрица жесткости и вектор перемещений узлов  $i$ -го КЭ;  $V$  — объем материала;  $v_i$  — объем КЭ;  $f_0$  — заданное объемное отношение [13],  $V_0$  — начальный объем расчетной области;  $x_{\min}$  и  $x_{\max}$  — минимальная и максимальная относительная плотность КЭ.

Ненулевое значение минимальной относительной плотности  $x_{\min}$  введено с целью исключения сингулярности системы алгебраических уравнений.

Разница между методами ESO-SIMP и SIMP заключается в ограничении объема. В методе ESO при каждой итерации КЭ, относительная плотность которых меньше или равна коэффициенту отбраковки, удаляются из области разработки, а все оставшиеся КЭ вводятся в следующую итерацию.

**Исследования синтеза бионических тонкостенных конструкций типа ОФ с вырезом самолета местных воздушных линий. Синтез бионической тонкостенной конструкции ОФ постоянной толщины.** Рассмотрен синтез бионической конструкции ОФ с вырезом при толщине  $t = 6, 8, 10, 12, 14$  и  $16$  мм. Проведение ТО для тонкостенной конструкции в объемной постановке требует значительно больших временных затрат и машинных ресурсов, чем в плоской постановке.

Геометрическая и конечно-элементная модели оптимизируемого ОФ приведены на рис. 1, а и б. В качестве граничного условия использована жесткая заделка в переднем сечении ОФ, нагрузка приложена к заднему сечению. Рассмотрены пять расчетных случаев (РС) нагружения ОФ. Параметры нагружения приведены в табл. 1, где  $P_y$  и  $P_z$  — перерезывающие

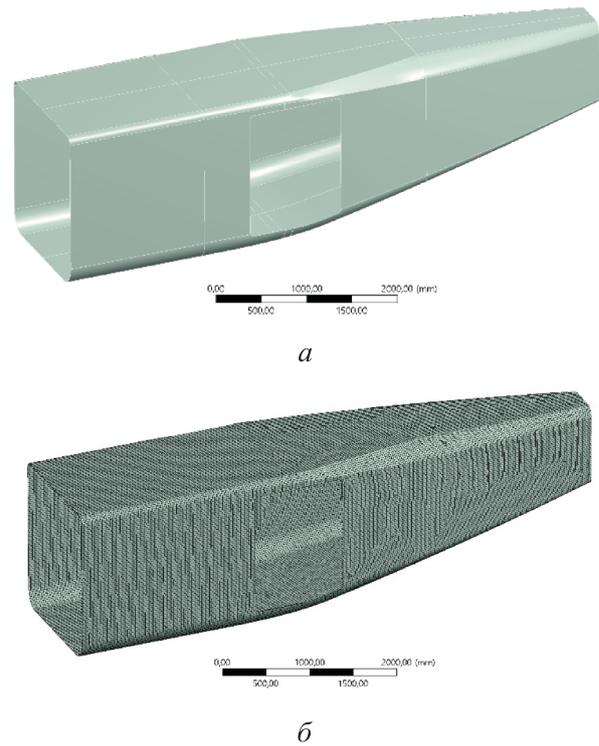


Рис. 1. Геометрическая (а) и конечно-элементная модели (б) оптимизируемого ОФ

Таблица 1

Параметры РС нагружения ОФ

Номер РС	$P_y$ , Н	$P_z$ , Н	$M_x$ , Н·м
1	13 000	–	–
2	–	8000	8000
3	–	–8000	–8000
4	10 400	6400	8200
5	–4800	–6400	–7400

силы в направлении осей  $y$  и  $z$ ;  $M_x$  — изгибающий момент относительно оси  $x$ .

Схема нагружения ОФ для РС № 5 приведена на рис. 2, где синим цветом показана заделка, а красным — сосредоточенные силы, изгиба-

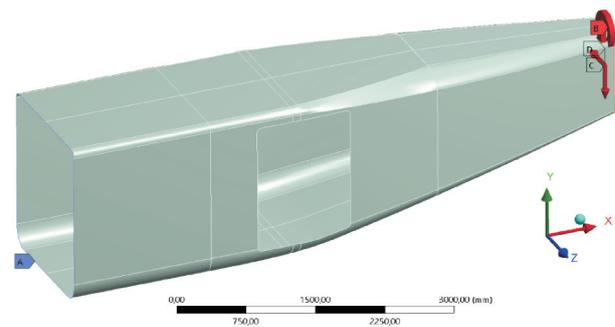


Рис. 2. Схема нагружения ОФ для РС № 5

Таблица 2

## Результаты прочностного анализа исходных ОФ разной толщины

t, мм	КЗП					КЗУ					m, кг
	Номер РС										
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
3	1,35	1,88	1,88	9,19	4,75	<b>0,28</b>	<b>0,53</b>	<b>0,38</b>	<b>0,35</b>	<b>0,51</b>	296
4	1,80	2,53	2,53	12,70	6,47	<b>0,64</b>	1,25	<b>0,90</b>	<b>0,80</b>	1,17	395
5	2,27	3,21	3,21	16,44	8,32	1,22	2,39	1,73	1,51	2,24	498
7	3,26	4,69	4,69	22,62	12,50	3,19	6,27	4,59	3,88	5,96	691
10	4,94	7,28	7,28	30,46	20,11	8,76	17,42	12,91	10,53	16,70	988

ющий и крутящий моменты, приложенные на удалении.

Предварительно проведена оценка прочности и устойчивости исходных ОФ толщиной  $t = 3, 4, 5, 7$  и  $10$  мм. Результаты прочностного анализа исходной конструкции ОФ — значения коэффициентов запаса прочности (КЗП) и устойчивости (КЗУ), массы  $m$  — при разной толщине ОФ приведены в табл. 2, где жирным шрифтом выделены критичные значения.

Из табл. 2 следует, что в рассмотренном диапазоне толщины ОФ статическая прочность обеспечена. Самым критичным РС нагружения с точки зрения обеспечения устойчивости оказался РС № 1, при этом для конструкций толщиной  $t \geq 5$  мм устойчивость обеспечена. Таким образом, нецелесообразно проводить ТО исследуемого отсека толщиной менее 5 мм.

Для проведения ТО выбрана конструкция ОФ толщиной  $t = 6, 8, 10, 12, 14$  и  $16$  мм с сохранением соответственно 50 (311,4 кг), 38 (317,5 кг), 30 (305,6 кг), 25 (307,7 кг), 22 (310,3 кг) и 19 % (303,6 кг) исходной массы с целью обеспечения примерно одинаковой массы получаемого ОФ. Процедура ТО выполнена для спектра нагружения, состоящего из пяти РС с параметрами, указанными в табл. 1.

Чтобы создать после автоматической процедуры ТО конечно-элементную модель ОФ, необходимо привести геометрическую модель к надлежащему виду с точки зрения технологии изготовления и целесообразности исключения из конструкции несущих элементов, удалив отверстия малого диаметра и рудиментарные участки конструкции, введя закругления и нарастив металлом некоторые зоны.

Таким образом, итоговая масса ОФ может отличаться от таковой для оптимизированной

конструкции, предложенной алгоритмом программы сразу после процедуры ТО. В связи с этим условимся, что масса оптимизированной конструкции ОФ после преобразования геометрической модели не должна выходить за рамки диапазона  $\pm 5\%$  целевой массы (300 кг).

Геометрические модели оптимизированных ОФ толщиной  $t = 6, 8, 10, 12, 14$  и  $16$  мм после сглаживания, устранения части малых отверстий и несущих элементов приведены на рис. 3, а–е.

Формы потери устойчивости оптимизированных ОФ толщиной  $t = 6$  мм для РС № 1 и 2 показаны на рис. 4, а, б.

Результаты оценки прочности и устойчивости оптимизированных ОФ толщиной  $t = 6, 8, 10, 12, 14$  и  $16$  мм приведены в табл. 3, где жирным шрифтом выделены значения, при которых уровень КЗУ превысил допускаемый.

Из табл. 3 следует, что прочность оптимизированных ОФ обеспечена при всех РС нагружения. Устойчивость конструкций толщиной  $t = 6$  и  $8$  мм для отдельных РС не обеспечена. Для всех рассмотренных значений толщины масса ОФ находится в пределах заданной погрешности ( $\pm 5\%$  целевой массы).

Вероятно, после доработки конструкции путем локального увеличения толщины или добавления ребер жесткости удастся обеспечить устойчивость и для ОФ толщиной  $t = 6$  и  $8$  мм. Недостаток такого подхода заключается в дополнительном задействовании пользователя и увеличении массы конструкции.

В связи с этим очевидно, что использование изначально большей толщины ОФ при ТО дает возможность получить конструкцию, способную обеспечить как прочность, так и устойчивость в автоматическом режиме работы процедуры ТО.

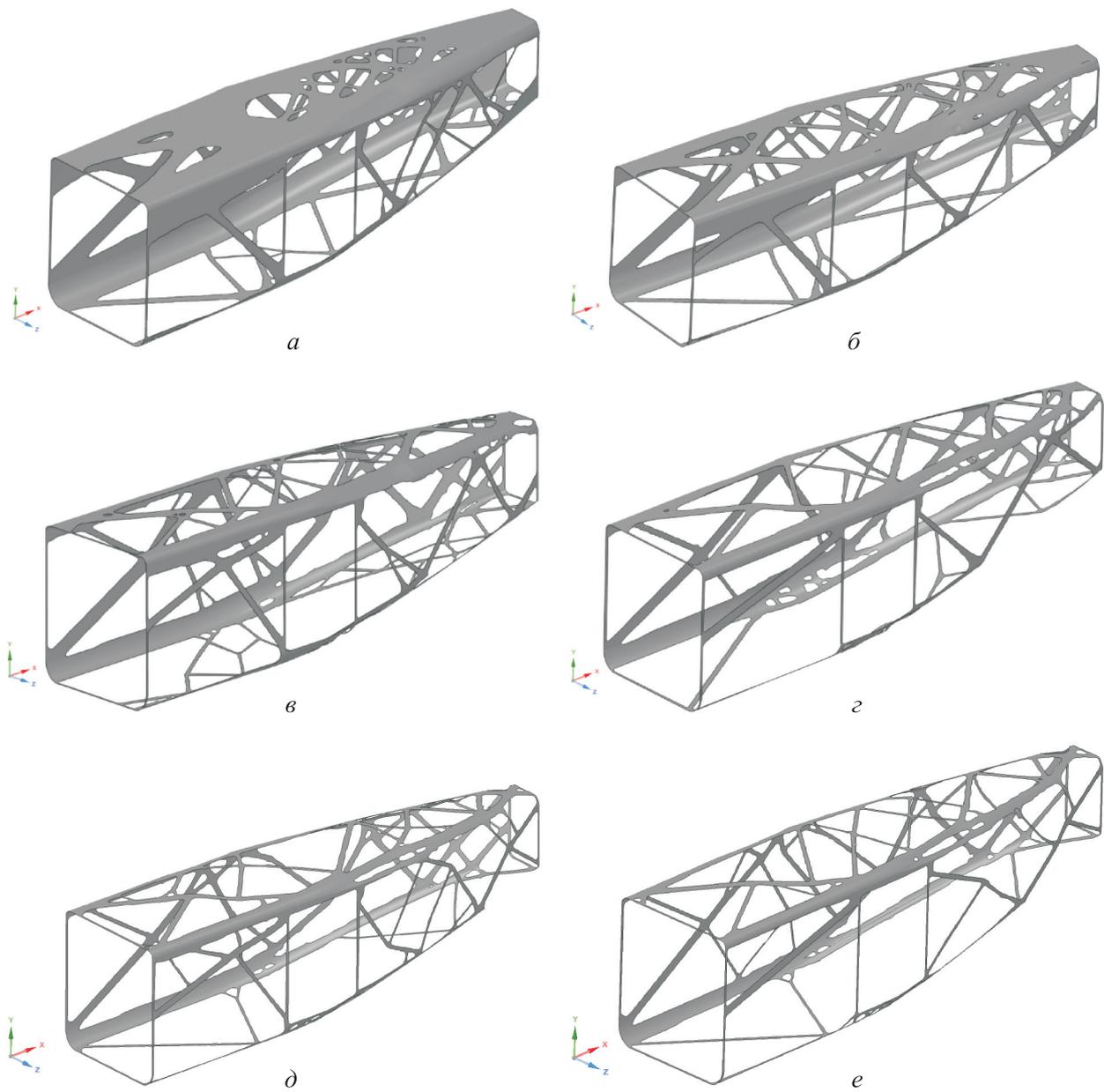


Рис. 3. Геометрические модели оптимизированных ОФ толщиной  $t = 6$ , (а), 8 (б), 10 (в), 12 (г), 14 (д) и 16 мм (е)

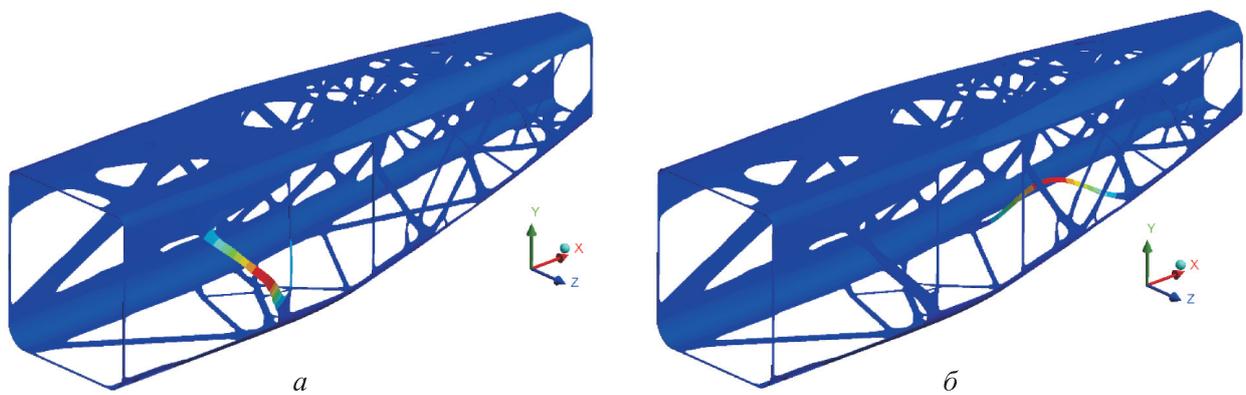


Рис. 4. Формы потери устойчивости оптимизированных ОФ толщиной  $t = 6$  мм для РС № 1 (а) и № 2 (б)

Таблица 3

Результаты оценки прочности и устойчивости оптимизированных ОФ разной толщины

t, мм	КЗП					КЗУ					m, кг
	Номер РС										
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
6	3,18	5,30	5,30	16,36	15,50	<b>0,59</b>	1,13	1,63	<b>0,88</b>	1,03	311,4
8	4,09	6,76	6,76	13,42	18,57	<b>0,89</b>	1,22	2,62	1,51	1,40	317,5
10	3,52	6,53	6,53	15,94	18,73	1,36	2,81	2,32	2,19	1,40	305,6
12	4,89	10,69	10,69	16,48	20,61	1,03	1,75	2,41	1,14	2,34	307,7
14	3,91	8,67	8,67	11,18	16,91	3,18	3,56	5,04	3,49	2,65	310,3
16	3,93	6,65	6,65	8,88	14,65	2,65	2,35	3,16	3,59	3,37	303,6

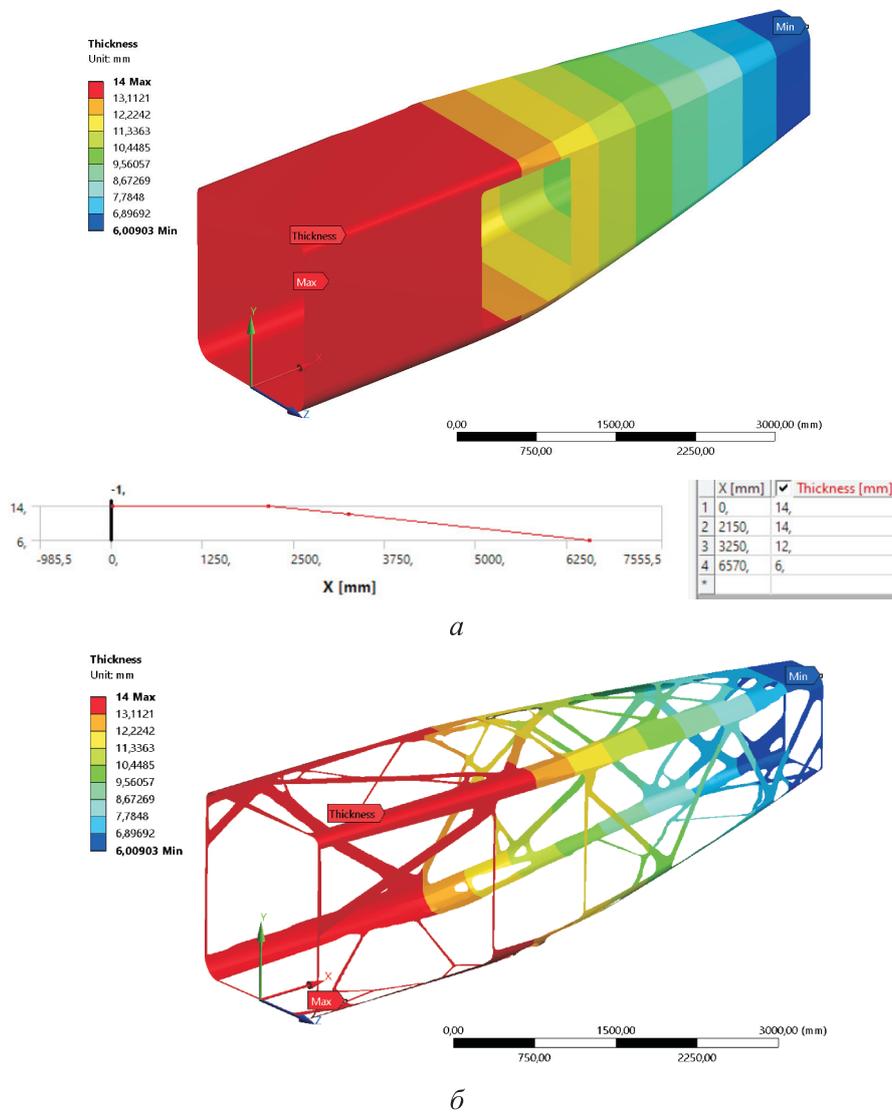


Рис. 5. Распределения толщин в оптимизированных ОФ до (а) и после (б) ТО

**Синтез бионического тонкостенного ОФ переменной толщины.** Выполним процедуру ТО для тонкостенного ОФ переменной толщи-

ны. Из результатов, полученных для ОФ постоянной толщины, следует, что для обеспечения запаса устойчивости в зоне конструкции до вы-

реза под дверь толщина ОФ должна составлять 14 мм, в зоне выреза под дверь — от 14 до 12 мм, в зоне за этим вырезом — от 12 до 6 мм (рис. 5, а).

Масса ОФ переменной толщины  $t = 6...14$  мм составила 1164 кг. Таким образом, для получения массы оптимизированного ОФ, равной целевой массе 300 кг, необходимо выполнить процедуру ТО с сохранением 25 % массы.

Распределение толщин в оптимизированном ОФ после ТО показано на рис. 5, б. Масса такой конструкции составила 312,9 кг. Результаты оценки прочности и устойчивости оптимизированных ОФ переменной толщины  $t = 6...14$  мм приведены в табл. 4.

Из табл. 4 следует, что оптимизированным ОФ обеспечены устойчивость и прочность. Коэффициенты запаса прочности и устойчивости значительно превышают единицу.

Таблица 4

Результаты оценки прочности и устойчивости оптимизированных ОФ переменной толщины  $t = 6...14$  мм

Номер РС	КЗП	КЗУ
1	3,18	1,78
2	7,05	2,46
3	7,05	2,59
4	8,15	1,63
5	13,58	3,66

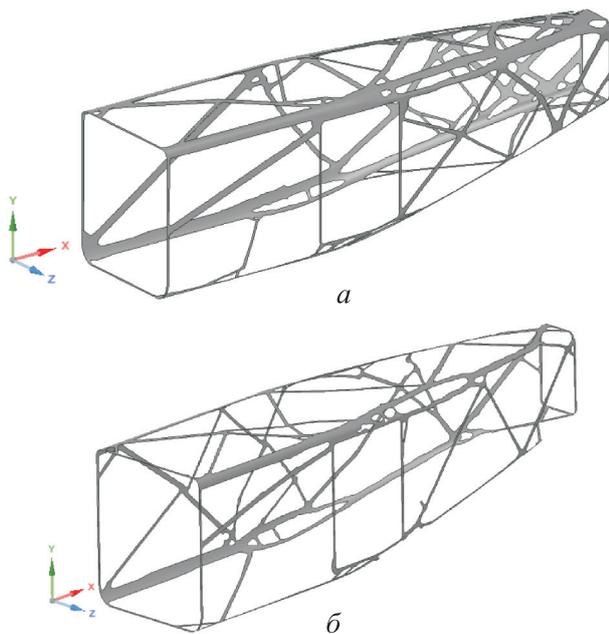


Рис. 6. Геометрические модели оптимизированных ОФ толщиной  $t = 6...14$  мм (а) и  $t = 16$  мм (б)

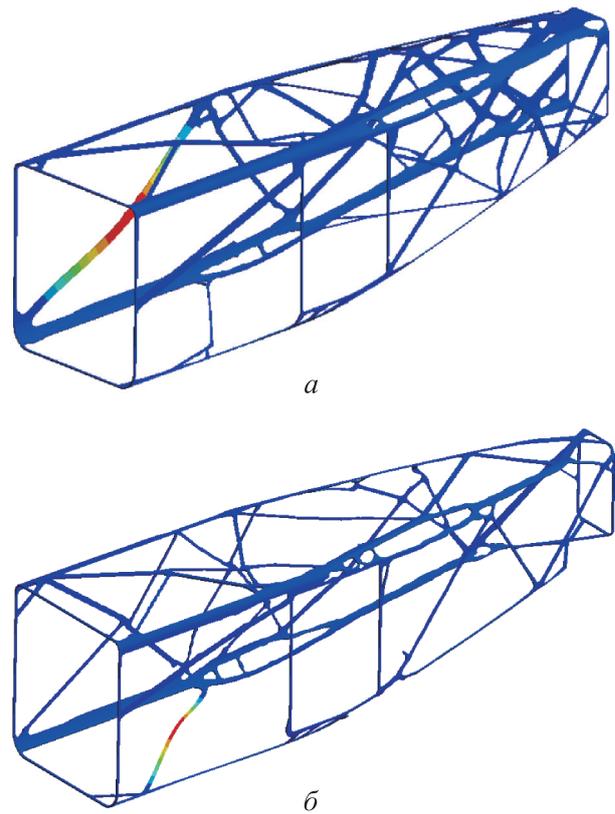


Рис. 7. Формы потери устойчивости оптимизированных ОФ толщиной  $t = 6...14$  мм для РС № 5 (а) и  $t = 16$  мм для РС № 1 (б)

Оценим преимущество использования ОФ переменной толщины перед ОФ постоянной толщиной при ТО. Для этого дополнительно проведем ТО конструкций ОФ переменной ( $t = 6...14$  мм) и постоянной ( $t = 16$  мм) толщины до получения близких к единице КЗУ и сопоставим массу полученных оптимизированных конструкций.

Геометрические модели оптимизированных ОФ переменной ( $t = 6...14$ ) и постоянной ( $t = 16$  мм) толщины приведены на рис. 6. Для конструкции переменной толщины процедура ТО проведена с сохранением 19 % исходной массы (224,5 кг), для конструкции толщиной  $t = 16$  мм — 13 % (195,3 кг).

Формы потери устойчивости оптимизированных конструкций для РС с наименьшим КЗУ, равным 1,09, показаны на рис. 7. После процедуры ТО прочность ОФ переменной толщины обеспечивалась автоматически, а для достижения прочности ОФ толщиной  $t = 16$  мм потребовалось незначительное дополнительное корректирование геометрической модели путем увеличения ширины некоторых зон.

Таблица 5

Результаты оценки прочности и устойчивости оптимизированных ОФ переменной и постоянной толщины

Номер РС	КЗП	КЗУ	КЗП	КЗУ	КЗП	КЗУ
	Толщина $t$ , мм					
	6...14		12		16	
1	2,01	1,23	4,89	<b>1,03</b>	<b>1,02</b>	<b>1,09</b>
2	4,92	1,29	10,69	1,75	1,64	1,54
3	4,92	1,39	10,69	2,41	1,64	1,89
4	2,04	1,23	16,48	1,14	1,11	1,65
5	3,47	<b>1,09</b>	20,61	2,34	1,92	2,07

Результаты оценки прочности и устойчивости оптимизированных ОФ переменной ( $t = 6...14$  мм) и постоянной ( $t = 16$  мм) толщины приведены в табл. 5, где жирным шрифтом выделены значения, при которых уровень КЗУ минимальный. Там же показаны ранее полученные результаты для конструкции толщиной  $t = 12$  мм. При толщине  $t = 6...14$  мм масса оптимизированного ОФ составила 224,5 кг, при  $t = 12$  мм — 307,7 кг, при  $t = 16$  мм — 195,3 кг.

Для рассмотренных конструкций удалось обеспечить прочность и устойчивость, причем по сравнению с ОФ толщиной  $t = 12$  мм у ОФ толщиной 6...14 мм и 16 мм удалось получить значительный выигрыш по массе. При выполнении процедуры ТО с сохранением меньшей массы относительно исходной даже для ОФ большей толщины (менее 19 %) возникает риск получения конструкции с коэффициентом за-

паса прочности меньше единицы без дополнительных доработок пользователем.

## Выводы

1. Показано, что в целом модуль ТО в ANSYS Workbench обладает широким диапазоном применения для проведения процедуры ТО тонкостенных конструкций. Помимо удобного для пользователя интерфейса и возможности задания РС нагружения модуль позволяет выбирать алгоритм ТО, выполнять ТО для тонкостенной конструкции переменной и постоянной толщины.

2. Использование ОФ переменной или постоянной толщины при проведении ТО не дает значительных преимуществ одной конструкции перед другой. В связи с этим исходные данные для процедуры ТО в большей степени зависят от выбора пользователя.

## Литература

- [1] Saleem W., Lu H., Yuqing F. Topology optimization — problem formulation and pragmatic outcomes by integration of TOSCA and CAE tools. *Proc. WCECS*, 2008, pp. 1–6.
- [2] Blattman W.R. *Generating CAD parametric features based on topology optimization results*. MS thesis. Brigham Young University, 2008. 84 p.
- [3] Vincent J.F.V. Adaptive structures — some biological paradigms. In: *Adaptive structures. Engineering applications*. Wiley, 2007, pp. 261–283, doi: <https://doi.org/10.1002/9780470512067.ch10>
- [4] Kobayashi M.H. On a biologically inspired topology optimization method. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 2010, vol. 15, no. 3, pp. 787–802, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.04.014>
- [5] Bendsoe M.P., Sigmund O. Topology optimization. Theory, methods and applications. *Springer*, 2004. 370 p.
- [6] Osher S., Fedkiw R. Level set methods and dynamic implicit surfaces. *Springer*, 2003. 273 p.
- [7] Wang S.Y., Lim K.M., Khoo B.C. et al. An extended level set method for shape and topology optimization. *J. Comput. Phys.*, 2007, vol. 221, no. 1, pp. 395–421, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2006.06.029>

- [8] Liu Z., Korvink J.G., Huang R. Structural topology optimization: fully coupled level set method via FEMLAB. *Struct. Multidisc. Optim.*, 2005, vol. 29, no. 6, pp. 407–417, doi: <https://doi.org/10.1007/s00158-004-0503-z>
- [9] Huang X., Xie Y.M. *Evolutionary topology optimization of continuum structures*. Wiley, 2010. 240 p.
- [10] Apte A.P., Wang B.P. 3D topology optimization using hyper radial basis function network. *AIAA Paper*, 2009, no. AIAA2009-2210, doi: <https://doi.org/10.2514/1.28723>
- [11] Bayley D.J., Hartfield R.J.Jr., Burkhalter J.E. et al. Design optimization of a space launch vehicle using a genetic algorithm. *J. Spacecr. Rockets*, 2008, vol. 45, no. 4, pp. 733–74, doi: <https://doi.org/10.2514/1.35318>
- [12] Курейчик В.М. Квантовые и генетические алгоритмы — новая технология эволюционного поиска. *Вестник ЮНЦ РАН*, 2005, т. 1, № 2, с. 41–50.
- [13] Jiao H., Zhou Q., Fan S. et al. A new hybrid topology optimization method coupling ESO and SIMP method. In: *Proceedings of China Modern Logistics Engineering*. Springer, 2014, pp. 373–384, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-44674-4\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-662-44674-4_35)

## References

- [1] Saleem W., Lu H., Yuqing F. Topology optimization — problem formulation and pragmatic outcomes by integration of TOSCA and CAE tools. *Proc. WCECS*, 2008, pp. 1–6.
- [2] Blattman W.R. *Generating CAD parametric features based on topology optimization results*. MS thesis. Brigham Young University, 2008. 84 p.
- [3] Vincent J.F.V. Adaptive structures — some biological paradigms. In: *Adaptive structures. Engineering applications*. Wiley, 2007, pp. 261–283, doi: <https://doi.org/10.1002/9780470512067.ch10>
- [4] Kobayashi M.H. On a biologically inspired topology optimization method. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 2010, vol. 15, no. 3, pp. 787–802, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.04.014>
- [5] Bendsoe M.P., Sigmund O. Topology optimization. Theory, methods and applications. *Springer*, 2004. 370 p.
- [6] Osher S., Fedkiw R. Level set methods and dynamic implicit surfaces. *Springer*, 2003. 273 p.
- [7] Wang S.Y., Lim K.M., Khoo B.C. et al. An extended level set method for shape and topology optimization. *J. Comput. Phys.*, 2007, vol. 221, no. 1, pp. 395–421, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2006.06.029>
- [8] Liu Z., Korvink J.G., Huang R. Structural topology optimization: fully coupled level set method via FEMLAB. *Struct. Multidisc. Optim.*, 2005, vol. 29, no. 6, pp. 407–417, doi: <https://doi.org/10.1007/s00158-004-0503-z>
- [9] Huang X., Xie Y.M. *Evolutionary topology optimization of continuum structures*. Wiley, 2010. 240 p.
- [10] Apte A.P., Wang B.P. 3D topology optimization using hyper radial basis function network. *AIAA Paper*, 2009, no. AIAA2009-2210, doi: <https://doi.org/10.2514/1.28723>
- [11] Bayley D.J., Hartfield R.J.Jr., Burkhalter J.E. et al. Design optimization of a space launch vehicle using a genetic algorithm. *J. Spacecr. Rockets*, 2008, vol. 45, no. 4, pp. 733–74, doi: <https://doi.org/10.2514/1.35318>
- [12] Kureychik V.M. Quantum and genetic algorithms as a new technology of evolutionary search. *Vestnik YuNTs RAN*, 2005, vol. 1, no. 2, pp. 41–50. (In Russ.).
- [13] Jiao H., Zhou Q., Fan S. et al. A new hybrid topology optimization method coupling ESO and SIMP method. In: *Proceedings of China Modern Logistics Engineering*. Springer, 2014, pp. 373–384, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-44674-4\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-662-44674-4_35)

## Информация об авторах

**ЖЕЛЕЗНОВ Лев Петрович** — доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель начальника отделения усталостной и статической прочности конструкций, начальник аспирантуры. ФАУ «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина» (630051, Новосибирск, Российская Федерация, ул. Ползунова, д. 21, e-mail: Zgeleznov@sibnia.ru).

**ЛАПЕРДИНА Наталья Андреевна** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник отделения усталостной и статической прочности конструкций. ФАУ «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина» (630051, Новосибирск, Российская Федерация, ул. Ползунова, д. 21, e-mail: laperdinaN@sibnia.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Железнов Л.П., Лапердина Н.А. Исследования синтеза бионических тонкостенных конструкций типа отсека фюзеляжа самолета. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 4, с. 62–71, doi: 10.18698/0536-1044-2023-4-62-71

### Please cite this article in English as:

Zheleznov L.P., Laperdina N.A. Research on the synthesis of bionic thin-walled structures of the aircraft fuselage compartment type. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 4, pp. 62–71, doi: 10.18698/0536-1044-2023-4-62-71

## Information about the authors

**ZHELEZNOV Lev Petrovich** — Doctor of Science (Eng.), Senior Researcher, Deputy Head of Department of Fatigue and Static Strength of Structures, Head of Postgraduate Department. Chaplygin Siberian Scientific Research Institute of Aviation (630051, Novosibirsk, Russian Federation, Polzunova St., Bldg. 21, e-mail: Zgeleznov@sibnia.ru).

**LAPERDINA Natalia Andreevna** — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher, Department of Fatigue and Static Strength of Structures, Head of Postgraduate Department. Chaplygin Siberian Scientific Research Institute of Aviation (630051, Novosibirsk, Russian Federation, Polzunova St., Bldg. 21, e-mail: laperdinaN@sibnia.ru).



## Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебник под редакцией Д.А. Ягодникова, А.И. Коломенцева «Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей»

Содержит термогазодинамические основы рабочего процесса в камере ЖРД; рассмотрены теория тяги, удельный импульс. Приведены высотные и дроссельные характеристики; даны расчеты процессов сгорания, истечения продуктов сгорания, основных размеров камеры сгорания ЖРД, устойчивости рабочего процесса в ЖРД, теория и расчет круглых и кольцевых сопел, а также историческая справка о развитии ракетного двигателестроения.

Для студентов технических университетов и машиностроительных вузов.

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>