

УДК 539.42

DOI: 10.22213/2410-9304-2022-3-66-75

Оптимальное проектирование композитных коробчатых конструкций

В. И. Кучерюк, кандидат технических наук, профессор, Тюменский государственный институт культуры, Тюмень, Россия

И. В. Шаптала, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

Н. А. Спиридонова, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

В данной работе рассматривается методика оптимизации коробчатых многосвязных тонкостенных конструкций как по материалам, так и по методам расчета. Такие конструкции широко применяются на транспорте, в строительстве и других областях. Примером таких конструкций являются кузова автобусов, троллейбусов, трамваев, трейлеров; корпуса железнодорожных вагонов, спецтранспорта; передвижных мастерских, жилых объектов и т. п.

Выполнена сначала глобальная, а затем локальная оптимизация для заданных воздействий с использованием системного анализа, математического моделирования и IT-технологий. В процессе оптимизации показано определение глобальной целевой функции и критериев оптимизации, глобальных и локальных ограничений. Предложена разработка проекта коробчатой тонкостенной композитной конструкции, включающей в себя геометрическое моделирование, подбор компонентов материала и составление композиции тонкостенных элементов. Для сравнения описано, как при компоновке композитной панели можно использовать природный биологический организм, из которого выделяются основные системы органов, обеспечивающие процессы его жизнедеятельности: опорно-двигательная, кровеносная, дыхательная и другие. Показано, что по аналогии с организмом транспортный объект (неоднородная система) может обеспечивать общую и местную прочность и жесткость элементов конструкции.

При составлении композиции тонкостенного элемента каждый вариант панели рассматривают как модуль со своими физико-механическими характеристиками.

Далее приведены методы, которые можно использовать при расчете неоднородной конструкции, и формулы для определения приведенных цилиндрических жесткостей для пластинчатых и оболочечных элементов «эквивалентного» однородного материала.

Показан пример оптимального проектирования тонкостенной композитной конструкции коробчатого типа.

Делается вывод о предложенной методике оптимального расчета и проектирования композитных тонкостенных конструкций с помощью системного подхода.

Ключевые слова: композитная панель, оптимизация, коробчатая конструкция, геометрическое моделирование.

Введение

Процесс глобальной оптимизации конструкций [1] заключается в анализе и синтезе системы «объект – среда». Для данной задачи следует использовать систему, иерархическая структурная схема показана на рис. 1.

Целью нашей работы является оптимизация системы, которая основывается на постановке

задачи, подборе прототипа, выборе целевой функции, критериев оптимизации, управляющей функции и ограничений.

Постановка задачи подробно изложена и сформулирована в виде структурной схемы в учебном пособии [2].

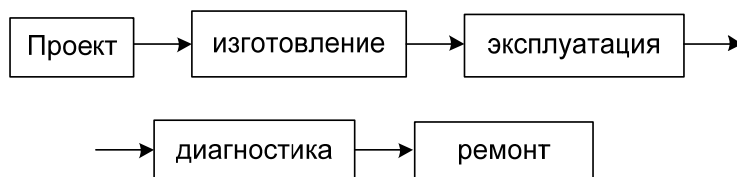


Рис. 1. Структурная схема

Fig. 1. Block diagram

Оптимальное проектирование: выбор геометрической и физической модели конструкции и метода ее расчета

Глобальную целевую функцию $F(x)$ и критерий оптимизации k [3] определяем по формулам (1) и (2):

$$F(x) = aC + bP = a \sum_{i=1}^5 C_i + b \sum_{i=1}^n P_i = \min, \quad (1)$$

$$k = \frac{F(x)}{N^{0,3(\lg N+1)}} = \min, \quad (2)$$

где X – вектор переменных; a, b – весовые коэффициенты (от 0 до 1); C – общая стоимость объекта (безразмерная); P – общая масса конструкции (безразмерная); $C_i = \frac{\bar{C}_i}{C_{\max}}$ – относительная стоимость каждого этапа (рис.); \bar{C}_i – стоимость каждого этапа; C_{\max} – наибольшая стоимость из пяти этапов; $P_i = \frac{\bar{P}_i}{P_{\max}}$ – относительная масса конструкции; \bar{P}_i – масса основных частей конструкции; P_{\max} – наибольшая масса части конструкции.

Весовые коэффициенты a и b принимаются в зависимости от назначения конструкции, например, для авиации $a < b$, а для наземного транспорта $a \leq b$; N – серийность изготовления, шт./год.

В формулах (1) и (2) в качестве отправной точки может быть использован прототип объекта с коробчатой конструкцией.

В процессе оптимизации различают (аналогично целевой функции) глобальные ограничения, относящиеся к объекту как к целому, и локальные – для коробчатой конструкции.

Глобальное ограничение определяется надежностью системы, т. е. преобразованием входных параметров (воздействий) в выходные параметры динамической системы (напряжений, деформаций). Отказ любого элемента рассматривается как отказ системы согласно рис. 1. Для такой системы, называемой нерезервированной, вероятность безотказной работы [4] будем определять по формуле [5]:

$$P(A) = \Phi(x) \cdot \left[\frac{(\eta - 1)}{\sqrt{\eta^2 V_R^2 + V_S^2}} \right], \quad (3)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt$ – функция нормального распределения во времени; x – срок существования системы; $\eta = \frac{m_R}{m_S}$; m_R, m_S – математическое ожидание несущей способности конструкции и нагрузки; $V = \frac{\sigma_R}{m_R}$; σ_R, σ_S – дисперсии несущей способности и нагрузки [6].

К глобальным ограничениям можно отнести и срок службы изделия, который определяется износом, коррозией и техническим устарением.

Локальные ограничения относятся к коробчатой композитной конструкции. Для обеспечения надежности предполагаем совместность деформаций компонентов композита. Принимаем следующие ограничения:

$$\begin{aligned} [\sigma_1]^- \leq \sigma_1 \leq [\sigma_1]^+, \quad [\sigma_2]^- \leq \sigma_2 \leq [\sigma_2]^+, \\ \tau_{12}^{\max} \leq [\tau_{12}], \\ \sigma_{12} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}, \\ \operatorname{tg} \alpha_{1,2} = \frac{\tau_{xy}}{\sigma_{1,2} - \sigma_y}, \end{aligned} \quad (4)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют главным напряжениям; α – угол главных направлений; прямоугольные скобки соответствуют допускаемым или нормативным напряжениям; знаки «+» и «-» – растяжению и сжатию.

При динамической нагрузке к условиям (4) следует добавить условие обеспечения усталостной прочности.

Существенную роль играет коэффициент, который входит в допускаемые напряжения. С одной стороны, занижение его величины отрицательно влияет на надежность конструкции, с другой – увеличение влияет на вес конструкции, что приводит к подорожанию изделия и дополнительным эксплуатационным расходам.

В [7] приведена формула для коэффициента запаса, полученная Леви при нормальном распределении вероятности разрушения материала:

$$k_1 = \frac{1 + \gamma \cdot K_{1-q}}{1 + \gamma \cdot K_r}, \quad (5)$$

где γ – коэффициент вариации генеральной совокупности; K_{1-q}, K_r – процентные квантили нормированного нормального распределения. Число r является уровнем надежности и определяет вероятность того, что прочность σ пре-

восходит действующие напряжения σ_d (вероятность безотказной работы):

$$r = P[\sigma > \sigma_d].$$

Переходим к разработке проекта (рис. 1) коробчатой композитной конструкции. Алгоритм процесса проектирования имеет вид: «проект» → «геометрическая модель» → «проектирование материала» → «выбор критериев» → «выбор методов расчета» → «анализ результата».

Геометрическое моделирование заключается в определении основных размеров, выборе распределения материала, расположении продольных и поперечных перегородок, расположении вырезов под двери и окна. Эти геометрические параметры зависят от назначения объекта, условий эксплуатации, транспортируемых грузов, климата и других характеристик. В качестве отправной точки служит прототип. Коробчатую конструкцию целесообразно составить из пластинчатых и оболочечных элементов переменной жесткости. Для составления функции распределения жесткости в пластинах и оболочках следует использовать геометрическую модель в виде сплошного параллелепипеда из однородного и изотропного линейно-упругого материала. Определение напряженного состояния параллелепипеда при действии ранее определенных нагрузок выполняется методами линейной теории упругости [8, 9]. Целесообразно использовать пакеты стандартных программ, позволяющих получить графическое изображение распределения главных и касательных напряжений. Аппроксимируя числовые данные,

можно получить в аналитическом виде функцию, управляющую изменением цилиндрической жесткости пластинчатых и оболочечных элементов конструкции, оптимизировать расположение перегородок и вырезов с учетом назначения конструкции. На этом заканчивается геометрическое моделирование коробчатой конструкции.

Второй и третий этапы составления проекта (проектирование материала и выбор критериев) заключаются в подборе компонентов материала и в составлении композиции тонкостенных элементов.

В зависимости от размеров конструкции в целом возможны два варианта: одновременное изготовление материала и конструкции, отдельное изготовление плоских и пологих композитных панелей с последующим соединением в коробку.

Для каждой панели рассматриваются следующие варианты композиции: однослойный дисперсно-упрочненный, однослойный волокнистый, многослойный дисперсно-упрочненный, многослойный волокнистый и комбинированные. При составлении компьютерной программы имеет смысл использовать принцип параметризации в моделировании.

Каждый вариант композитной панели рассматривается как модуль со своими характеристиками, которому присваивается условное обозначение.

Для компоновки композитной панели (модуля) с использованием справочной литературы составляется табл. 1 для различных материалов.

Таблица 1. Физико-механические характеристики модуля

Table 1. Physical and mechanical characteristics of the module

Физ.-мех. хар./материал	E	G	ν	ρ	k_y	C_t	k_t	k_s	k_k	k_c	k_e	$\varepsilon_n(t)$
Сталь												
Алюминиевые сплавы												
Сплавы меди												
Титановые сплавы												
Углерод												
Стекло												
Полиуретан												
и т. д.												

В таблице приняты следующие обозначения: E – модуль упругости, G – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона, ρ – плотность материала, $k_y = \frac{\sigma_e}{\gamma}$ – коэффициент удельной прочности, σ_e – предел прочности, γ – удельный

вес, C_t – коэффициент теплопроводности, k_t – коэффициент температурного линейного расширения, $k_s = \frac{T}{C}$ – коэффициент эксплуатационной эффективности, T – долговечность (время) эксплуатации материала; C – стоимость материала, k_k – коэффициент коррозионной стойко-

сти, $k_c = \frac{C}{C_c}$ – коэффициент относительной стоимости, C_c – стоимость стали, k_b – коэффи-

циент ударной вязкости, $\varepsilon_n(t)$ – предельная деформация ползучести.

Далее составляется табл. 2 сочетаний материалов контактирующих слоев.

Таблица 2. Сочетания материалов контактирующих слоев модуля

Table 2. Combinations of materials of contacting layers of the module

Материал	Алюминиевые сплавы	Сплавы меди	Титановые сплавы	Углерод	и т. д.
Сталь	1	2	3	4	...
Алюминиевые сплавы	21	22	23	24	...
Сплавы меди	31	32	33	34	...
Титановые сплавы	41	42	43	44	...
Углерод	51	52	...		
Стекло	...				
и т. д.					

Данная таблица позволит оптимально учесть общее и местное напряженное состояние. При работе коробчатой конструкции на общий изгиб волокна целесообразно располагать вдоль оси конструкции.

В табл. 2 цифры присваиваются сочетаниям материалов при составлении компьютерной программы.

Следующим важным компонентом композитной конструкции является клей, прочность которого должна быть не меньше слабейшего из соединяемых элементов.

По справочным материалам составляется табл. 3 для различных марок клеев (вяжущего материала).

Таблица 3. Физико-механические характеристики клея

Table 3. Physical and mechanical characteristics of the adhesive

Физ.-мех. хар./марка	E	G	ν	ρ	k_t	k_o	k_k	k_c	ε_n	$\varepsilon_n(t)$

В табл. 3 приняты обозначения: $k_p = \frac{\sigma_b}{\rho}$ – коэффициент удельной прочности при растяжении; $k_c = \frac{\tau_b}{\rho}$ – коэффициент удельной прочности при сдвиге; τ_b – предел прочности по касательным напряжениям; ε_n – предельная линейная деформация.

Другие коэффициенты указаны выше.

После составления таблиц производится первичная обработка данных. Сначала в зависимости от назначения, условий эксплуатации по принятым ограничениям отбрасываются материалы, например, из-за токсичности материала, водостойкости, агрессивности среды, срока эксплуатации, высокой стоимости, степени надежности и т. п.

Следующим шагом будет выбор варианта композитной панели. Например, для кузова транспорта [10] целесообразно взять комбини-

рованную двухслойную панель, при этом нагруженный слой может быть из листов постоянной толщины, выполненных из стали, алюминиевого сплава, титанового сплава, жестко армированного пластика; внутренний слой должен быть с низкой теплопроводностью.

Для компоновки композитной панели также можно использовать созданную природой биологическую систему – организм, из которого можно выделить четыре системы: костную, мышечную, сосудистую и нервную.

Одной из функций костной системы является обеспечение прочности и жесткости всего организма. Мышечная система, если рассматривать ее как биокompозит, представляется как матрица, связывающая кости, сосуды и нейронные сети, которые, с точки зрения прочности, являются армирующими компонентами [11, 12].

Транспортные объекты для выполнения заданных функций содержат системы, обеспечивающие прочность и жесткость. По аналогии с организмом основной задачей верхнего (на-

ружного) слоя панели является обеспечение прочности и жесткости конструкции; второй слой – матрица, кроме связующих функций, создает температурную защиту и участвует в общей прочности и жесткости панели. Подача электрической энергии (освещения, движения, обогрева) к потребителям осуществляется по алюминиевым или медным проводам, сжатого воздуха – по трубкам малого диаметра. Сигналы управления передаются по проводам.

Таким образом, композиция панели состоит из прочного и жесткого листа (металлического или армированного пластика) и полимера (матрицы) с диэлектрическими свойствами и низкой теплопроводностью, армированного электропроводящими волокнами и трубками. По аналогии с рецепторами организма в отдельных местах можно ввести в матрицу сеть тонких проводов, разрушение которых вместе с матрицей будет сигнализировать о трещинах или отслоениях в матрице. Надежность электропроводки обеспечивается количеством проводников аналогично организму.

Следующим этапом является выбор функции, управляющей глобальной жесткостью композитной коробчатой конструкции.

При отношении большего поперечного размера к длине конструкции меньше 1/3 коробчатая конструкция рассматривается как эквивалентный брус с приведенной жесткостью. Изгиб такого бруса описывается дифференциальным уравнением

$$E_{\text{пр}} I_3 y'' = M_x, \quad (6)$$

где $E_{\text{пр}}$ – приведенный модуль упругости; I_3 – момент инерции поперечного сечения эквивалентного бруса; M_x – изгибающий момент. Из уравнения (6) следует, что для равнопрочного эквивалентного бруса изгибная жесткость $E_{\text{пр}} I_3$ прямо пропорциональна M_x . Тогда для функции, управляющей жесткостью вдоль оси конструкции, можно записать

$$F_y(x) = \frac{M_x}{M_x^{\text{max}}}. \quad (7)$$

Изменение жесткости целесообразно производить волокнами и дисперсией во втором слое. Возможен вариант гофров в первом слое при совмещении их с эстетичным видом изделия.

Для расчета композитной конструкции применимы следующие методы [13]: метод конечного элемента, вариационный метод, метод Власова – Канторовича в сочетании с методами строительной механики (методы сил и переме-

щений), метод предельных состояний. При этом исходная конструкция из композитного материала заменяется эквивалентным однородным материалом с приведенными цилиндрическими жесткостями для пластин и оболочек [14, 15]: при изгибе

$$D_1^{\text{np}} = \frac{E_M^c a z_0^3}{6(1-\nu_M^2)} + \frac{E_M^p a}{6(1-\nu_M^2)} \left(\frac{h^3}{3} + \frac{z_0^3}{6} - \frac{z_0 h^2}{2} \right) + \frac{a\pi d^2}{4t_B} \left\{ \left[\left(z_0 - \frac{d}{2} \right)^2 + \left(z_0 - k_B - \frac{3d}{2} \right)^2 \right] \times \right. \\ \times \left[\frac{E_B}{1-\nu_B^2} - \frac{E_M^c}{1-\nu_M^2} \right] + \left. \left[\left(h - k_B - z_0 - \frac{3d}{2} \right)^2 + \left(h - z_0 - \frac{d}{2} \right)^2 \right] \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{E_B}{1-\nu_B^2} - \frac{E_M^c}{1-\nu_M^2} \right] \right\}, \quad (8)$$

при кручении

$$D_3^{\text{np}} = G_M \frac{a h^3}{12} + \frac{a\pi d^2}{2t_B} \left[\left(\frac{h}{2} - \frac{d}{2} \right)^2 + \left(\frac{h}{2} - k_B - \frac{3d}{2} \right)^2 \right] \times \\ \times (G_B - G_M),$$

где E_M^c, E_M^p, E_B – продольные модули упругости матрицы и волокон; G_M, G_B – модули сдвига материала матрицы и волокон; ν_M, ν_B – коэффициенты Пуассона матрицы и волокон; a – ширина пластинки (оболочки); h – толщина пластинки (оболочки); d – диаметр волокон; t_B, k_B – шаг волокон в плоскости пластины и по толщине соответственно; z_0 – положение нейтральной оси поперечного сечения выделенной из пластинки балки-полоски с приведенными механическими характеристиками.

При применении метода расчета по предельным состояниям должна быть учтена механика разрушения композитных материалов [16–18].

Приведем пример оптимального проектирования тонкостенной композитной конструкции коробчатого типа.

Постановка задачи: выполнить расчет оптимизации кузова трейлера к легковому автомобилю в первом приближении. Геометрическая модель кузова – тонкостенный параллелепипед с основными размерами, принятыми по прототипу: длина $L = 6,8$ м, ширина $B = 2,25$ м, высота $H = 2,5$ м.

Второй этап – моделирование оптимальной композиции материала кузова (коробчатой кон-

струкции). Используя прототипы для оптимизации, в первом приближении принимаем три варианта двухслойного композитного материала:

1) сталь типа Ст.3 (наружный слой) и вспененный жесткий пенополиуретан;

2) алюминиевый сплав типа Al 6061, вспененный жесткий пенополиуретан (внутренний слой кузова).

В табл. 4 приведены средние значения физико-механических свойств материалов из справочников и Internet'a. Здесь γ – удельный вес; E – продольный модуль упругости; σ_y – предел текучести; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести; σ_u – предел прочности; σ_{-1} – предел усталости; ν – коэффициент Пуассона; G – модуль сдвига.

Таблица 4. Значения физико-механических свойств материалов

Table 4. Values of physical and mechanical properties of materials

	γ , г/см ³	E , Па	ν	G	σ_y	$\sigma_{0,2}$	σ_u	σ_{-1}
Сталь Ст.3	7,8	$1,8 \cdot 10^{14}$	0,3	$0,8 \cdot 10^{14}$	$2,55 \cdot 10^8$	–	$4,5 \cdot 10^8$	$1,7 \cdot 10^7$
Алюминиевый сплав типа Al 6061	2,7	$0,71 \cdot 10^{11}$	0,3	$0,27 \cdot 10^{14}$	–	$4,08 \cdot 10^4$	$3,57 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^4$
Пластик, армированный стеклопластиком	2	$4 \cdot 10^{10}$	0,13	$0,29 \cdot 10^{13}$	–	–	$1,6 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^4$
Пенополиуретан жесткий вспененный	1,55	$1,2 \cdot 10^8$	0,22	$0,29 \cdot 10^8$	–	–	$3,25 \cdot 10^4$	–

Расчет стоимости изготовления кузова

Основные статьи стоимости:

1. Разработка проектов.
2. Стоимость материалов.
3. Стоимость изготовления кондуктора (стапеля) для сборки кузова.
4. Зарплата работников.
5. Накладные расходы.
6. Налог.
7. Стоимость расходных статей (электроэнергия, вода, сжатый воздух, обеспечение тепла).

Разработка проектов:

- а) конструкторский;
- б) технологический.

Конструкторский проект состоит из эскизного, технического и рабочего.

Все проекты состоят из чертежей и расчетно-пояснительных записок в бумажном и электронном варианте. Технологический проект состоит из конструкторской документации на изготовление кондуктора для кузова и описания технологических процессов.

Технологические процессы:

1. Резка металлов (сталь, алюминиевый сплав) под размер, окна и двери.
2. Резка под размер, окна и двери.
3. Наклейка пенополиуретана.
4. Лакокрасочное покрытие металлов.
5. Сварка стальных элементов (электро- и газовая).
6. Сварка элементов из алюминия (в среде аргона или лазерная).

7. Наклейка листового пенополиуретана на металл или пластик.

8. Нанесение жидкого пенополиуретана на металл или пластик.

9. Диагностические испытания на качество изготовления.

10. Штамповка деталей с криволинейными поверхностями.

Перечень специальностей:

- 1) программист;
- 2) конструктор;
- 3) технолог;
- 4) сборщик;
- 5) газорезчик;
- 6) резчик механическими ножницами;
- 7) сварщик;
- 8) малярных работ.

Одной из важнейших составляющих надежности является прочность кузова трейлера. Для выполнения численных расчетов, основываясь на прототипах, принимаем следующие толщины листовых компонентов конструкции: $t_1 = 0,8$ мм – стальной, $t_2 = 1$ мм – алюминиевый сплав, $t_3 = 3$ мм, упрочненный пластик, $t_4 = 50$ мм – жесткий пенополиуретан. Определим напряженное состояние принятой геометрической модели из композитного материала при общем изгибе от рабочей нагрузки. Предполагаем совместную деформацию элементов конструкции, которая обеспечивается нанесением пенополиуретана на наружный слой в горячем виде либо клеим на эпоксидной основе при использовании готового пенополиуретанового листа.

За расчетную модель принимается брус с постоянным поперечным сечением прямоугольной формы из однородного материала с размерами L , B , H . В расчете используются приведенные к однородному материалу геометрические и механические характеристики поперечного сечения эквивалентного бруса, приведенные в табл. 5, где a_i – коэффициент площадей сечения, A_i – приведенная площадь поперечного сечения, δ_i – приведенная толщина коробчатого сечения, W_i – момент сопротивления приведенной площади

сечения, q_i – интенсивность нагрузки от собственного веса кузова, M_i^{\max} – максимальный изгибающий момент; σ_i^{\max} – максимальное напряжение. На рис. 2 представлена схема нагрузки на эквивалентный брус и одна из эпюр изгибающего момента. Здесь q_1 – интенсивность от собственного веса, q_2 – интенсивность нагрузки от перевозимого персонала, q_3 – интенсивность от перевозимого груза, q_4 – интенсивность веса оборудования, систем вентиляции, водоснабжения, отопления, мебели.

Таблица 5. Геометрические и механические характеристики поперечного сечения бруса

Table 5. Geometric and mechanical characteristics of the cross section of the beam

Характеристики							
Варианты компоновки материала	a_i	A_i см ²	Δ_i см	W_i см ³	q_i Н/м	M_i^{\max} Нм	σ_i^{\max} Па
1	$4 \cdot 10^{-5}$	76,2	0,08	$2,4 \cdot 10^4$	1350	$4,88 \cdot 10^3$	$2,03 \cdot 10^6$
2	0,08	465,1	0,49	$3,92 \cdot 10^4$	916	$3,67 \cdot 10^3$	$0,94 \cdot 10^4$
3	0,05	579	0,6	$6,38 \cdot 10^4$	736	$2,16 \cdot 10^3$	$3,7 \cdot 10^3$

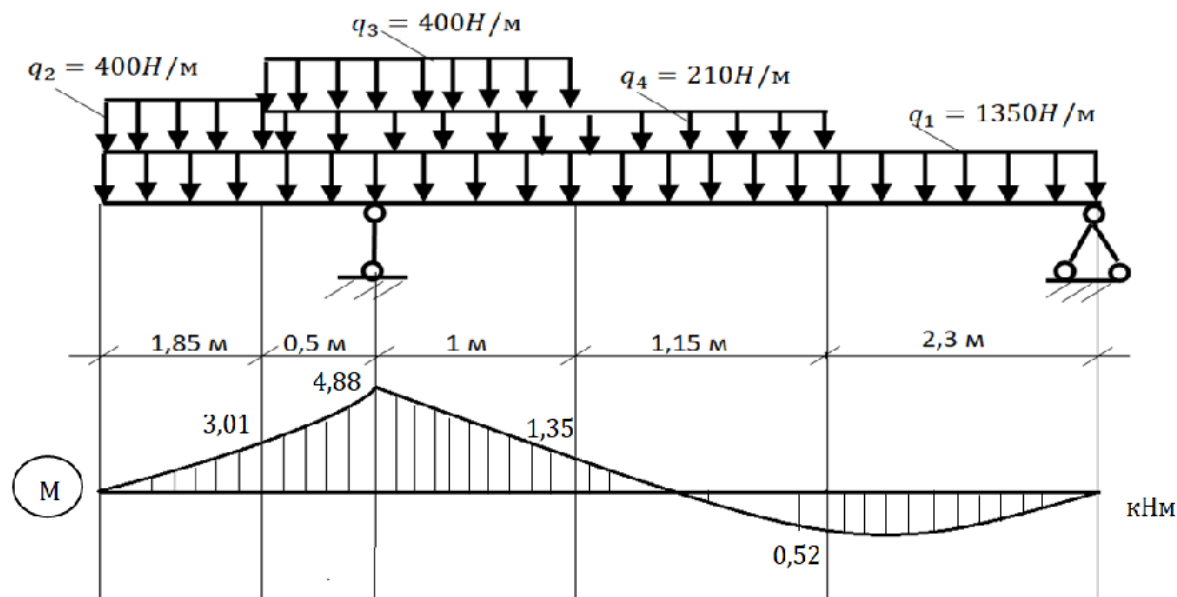


Рис. 2. Схема нагрузки на брус и эпюра изгибающего момента

Fig. 2. Scheme of the load on the beam and the diagram of the bending moment

Сравнивая σ_i^{\max} из табл. 5 и σ_y , $\sigma_{0,2}$, σ_{ut} , σ_{-1} , можно заключить, что прочность для всех вариантов композита обеспечена. Поэтому переходим к следующему этапу оптимизации.

В качестве критерия оптимизации примем минимум стоимости кузова трейлера согласно формуле (1). По данным интернета на апрель 2022 г. составлена табл. 6, где C_{1i} – стоимость

материала кузова; C_{2i} – стоимость заготовок кузова (операция резки лазером без пенополиуретана); C_{3i} – стоимость сборки кузова без пенополиуретана (сварка, склеивание листов стеклопластика); C_{4i} – стоимость покраски; C_{5i} – стоимость при пробеге 100000 км; C_i – общая стоимость варианта кузова без учета пенополиуретана, который присутствует во всех вариантах.

Таблица 6. Стоимость вариантов компоновки композита

Table 6. Cost of composite layout options

Стоимость						
Варианты компоновки композита	C_{1i} руб.	C_{2i} руб.	C_{3i} руб.	C_{4i} руб.	C_{5i} руб.	C_i руб.
1	73423	5000	1500	20000	506000	605923
2	45060	5000	1700	20000	343000	414760
3	66040	5000	3000	–	276000	350040

Их табл. 6 следует, что оптимальным вариантом является третий. Во втором приближении следует сделать уточнение по надежности и в зависимости от условий эксплуатации трейлера – по термостойкости и ремонтпригодности.

Выводы

Предложенная методика оптимального расчета и проектирования композитных коробчатых конструкций с вырезами, основанная на системном подходе, позволяет создать изделие минимального веса и приемлемой стоимости. В методике учитывается надежность, расчетная долговечность; предложены варианты композиций материалов конструкций, приведены критерии оптимизации.

Приведенный пример расчета оптимизации кузова трейлера подтверждает эффективность методики.

В заключение выполняется проверка на отсутствие резонанса, при необходимости – на жесткость и устойчивость.

В качестве блоков компьютерной программы могут быть использованы стандартные программы с соответствующим приведением, например SOLID, SOLID WORKS 2004, DIGIMAT, Laminate composites (NXLC) и др.

Библиографические ссылки

1. Рожваны Д. Оптимальное проектирование изгибаемых систем / пер. с англ. М.: Стройиздат, 1980. 310 с.
2. Смердов А. А. Основы оптимального проектирования композитных конструкций: учебное пособие. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 88 с.
3. Кучерюк В. И., Бабичев Д. Т., Шантала И. В. К системной оптимизации прямозубых цилиндрических передач // Интеллектуальные системы в производстве. 2019. Т. 17, № 3. С. 14–19.
4. Волков Л. И. Надежность летательных аппаратов: учебное пособие для авиационных вузов. М.: Высш. шк., 1975. 296 с.
5. Kucheruk V.I. Optimization and Mathematical Simulation of Transpedicular Fixator / V.I. Kucheruk, S.G. Petrov, G.L. Petrov, E.Y. Petrova, E.A. Berezuev // I.J. of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2019. Vol.8, pp. 46-52.
6. Силаев А. А. Спектральная теория подрессоривания транспортных машин. М.: Машиностроение, 1972. 192 с.
7. Композиционные материалы: в 8 т. / пер. с англ.; под ред. Л. Браугмана и Р. Крака. М.: Машиностроение, 1978. Пер. изд.: Composite Materials. Нью-Йорк, 1975. Т. 8. Анализ и проектирование конструкций. Ч. 2 / под ред. К. Чамиса. 1978. 264 с.
8. Безухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. М.: Высш. шк., 1968. 512 с.
9. Самуль В. И. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высш. шк., 1982. 264 с.
10. Прочность и долговечность автомобиля / Б. В. Гольд, Е. П. Оболенский, Ю. Г. Стефанович, О. Ф. Трофимов. М.: Машиностроение, 1974. 328 с.
11. Дубровский В. И., Федорова В. И. Биомеханика. М.: Владос-Пресс, 2003. 672 с.
12. Бегун П. И., Афонин П. Н. Моделирование в биомеханике. М.: Высш. шк., 2004. 390 с.
13. Вольфсон Б. П. Расчет сборных и монолитных коробчатых конструкций на изгиб и кручение. М.: Изд. лит. по строительству, 1968. 105 с.
14. Расчет тонкостенных конструкций объектов нефтяной и газовой промышленности / В. И. Кучерюк, Ю. Г. Сысоев, В. А. Иванов и др. М.: Недра, 1996. 279 с.
15. Kucheruk V. I., Umanskaya O. L., Krivchun N. A. Mathematical Modelling of the Calculation of the Stiffness Characteristics of Composite Materials. Periodical: Key Engineering Materials (Volume 771), Main Theme: Functional Material and Processing Technologies, edited by: Ha-Sung Kong, pp. 82-87, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.771.82>.
16. Разрушение конструкций из композитных материалов / И. В. Грушецкий, И. П. Димитриенко, А. Ф. Ермоленко и др.; под ред. В. П. Тамужа, В. Д. Протасова. Рига: Зинатне, 1986. 264 с.
17. Черепанов Г. П. Механика разрушения композиционных материалов. М.: Наука, Главная ред. физ.-мат. лит., 1983. 296 с.
18. Liebowitz H. Fracture Mathematical fundamentals. Volume 2 / H. Liebowitz. Academic Press, New-York and London, 1968. 705p.

References

1. Rojvani D. Optimalnoe proektirovanie izgibaemih system [Optimal design of bendable systems]. Per. s angl. Moscow, 1980, 310p. (in Russ.).

2. Smerdov A.A. *Osnovi optimalnogo proektirovaniya kompozitnih konstrukcii uchebnoe posobie* [Fundamentals of optimal design of composite structures]. Moscow, 2008, 88p. (in Russ.).
3. Kucheryuk V.I., Babichev D.T., Shaptala I.V. *K sistemnoi optimizacii pryamozubih cilindricheskikh peredach* [To system optimization of spur racks gear]. *Intellektualnie sistemi v proizvodstve*. 2019, vol. 17, no. 3, pp. 14-19 (in Russ.). DOI 10.22213/2410-9304-2019-3-14-19.
4. Volkov L.I. *Nadejnost letatelnih apparatov* [Reliability of aircraft]. Moscow, 1975, 296 p. (in Russ.).
5. Kucheruk V.I. Petrov S.G., Petrov G.L., Petrova E.Y., Berezuev E.A. *Optimization and Mathematical Simulation of Transpedicular Fixator*. I.J. of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2019. Vol.8, pp. 46-52.
6. Silaev A.A. *Spektralnaya teoriya podressorivaniya transportnih mashin* [Spectral theory of springing transport vehicles]. Moscow, 1972, 192 p. (in Russ.).
7. *Kompozicionnie materialy* [Composite materials]. In 8 volumes, per. s angl, pod red. L. Brautmana i R. Kraka, Moscow, Mashinostroenie, 1978. Per. izd. Composite Materials. New-York, 1975. Vol.8. *Analiz i proektirovanie konstrukcii*. Part 2, pod red. K. Chamisa. 1978, 264 p. (in Russ.).
8. Bezuhev N.I. *Osnovi teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti* [Fundamentals of the theory of elasticity, plasticity and creep]. Moscow, 1968, 512 p. (in Russ.).
9. Samul V.I. *Osnovi teorii uprugosti i plastichnosti* [Fundamentals of the theory of elasticity i plasticity]. Moscow, 1982, 264 p. (in Russ.).
10. Gold B.V., Obolenskii E.P., Stefanovich Y.G., Trofimov O.F. *Prochnost i dolgovechnost avtomobilya* [The strength and durability of the car]. Moscow, 1974, 328 p. (in Russ.).
11. Dubrovskii V.I., Fedorova V.I. *Biomehanika* [Biomechanics]. Moscow, 2003, 672 p. (in Russ.).
12. Begun P.I., Afonin P. N. *Modelirovanie v biomehanike* [Modeling in biomechanics]. Moscow, 2004, 390 p. (in Russ.).
13. Volfson B.P. *Raschet sbornih i monolitnih korobchatih konstrukcii na izgib i kruchenie* [Calculation of prefabricated and monolithic box structures for bending and torsion]. Moscow, 1968, 105p. (in Russ.).
14. Kucheryuk V.I., Sisoiev Y.G., Ivanov V.A., Belova O.Y., Chemakin M.P. *Raschet tonkostennih konstrukcii obektov neftyanoi i gazovoi promishlennosti* [Calculation of thin-walled structures of oil and gas industry]. Moscow, Nedra Publ., 1996, 279 p. (in Russ.).
15. Kucheruk V.I., Umanskaya O.L., Krivchun N.A. *Mathematical Modelling of the Calculation of the Stiffness Characteristics of Composite Materials*. Periodical: Key Engineering Materials (Volume 771), Main Theme: Functional Material and Processing Technologies, edited by: Ha-Sung Kong, pp. 82-87, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.771.82>.
16. Grushechii I.V., Dimitrienko I.P., Ermolenko A.F. *Razrushenie konstrukcii iz kompozitnih materialov* [Destruction of structures made of composite materials], pod red. V.P. Tamuja, V.D. Protasova. Riga, Zinatne, 1986, 264 p. (in Russ.).
17. Cherepanov G.P. *Mehanika razrusheniya kompozicionnih materialov* [Mechanics of destruction of composite materials]. Moscow, Nauka Publ., 1983, 296 p. (in Russ.).
18. Liebowitz H. *Fracture Mathematical fundamentals*. Volume 2 / H. Liebowitz. Academic Press, New-York and London, 1968, 705 p.

Optimal Desing of Composite Box-Type Structures

V. I. Kucheryuk, PhD in Engineering, Professor, Tyumen State Institute of Culture, Tyumen, Russia

I. V. Shaptala, Tyumen State University, Tyumen, Russia

N. A. Spiridonova, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

The present paper considers the optimization methods of box-type thin-wall structures both in terms of materials and in terms of calculation methods. These structures are widely used in transport, construction and other areas. The example of such structures are bodies of buses, trolleybuses, trams, camper vans, train carriages, emergency vehicles, mobile workshops, accommodation facilities and others.

At first global and later local optimization for the preset exposure by system analysis, mathematical modelling and IT-technologies were performed. Determination of global target function and optimization criteria, global and local limitations is shown during optimization. Development of a box-type composite thin-wall structure project was suggested including geometric simulation, selection of material components and thin-wall elements composition. For the purpose of comparison application of nature biological organism for combination of composite panel by separation of principal organ systems providing its vital activity: a locomotive, circulatory, inspiratory and etc., was described. It was shown that similarly to an organism a vehicle (non-uniform system) can provide general and local strength and rigidity of structural elements.

When composing a thin-wall element, each variant of a panel is considered as a module with its physical and mechanical characteristics.

Methods that can be applied to nonuniform structure analysis and formulae to determine the given flexural rigidity of plate and shell elements of "equivalent" uniform material are described further.

An example of box-type thin-wall composite structure optimal design was shown.

The conclusion with regard to the proposed method of optimal analysis and design of composite thin-wall structures is made by means of system approach.

Keywords: composite panel, optimization, box-type structure, geometric simulation.

Получено: 21.07.22